Année 1957-1958 3e Série — No 93

THÈSE

présentée

A LA FACULTÉ DE PHARMACIE DE NANCY

pour obtenir

Le Titre de Docteur de l'Université de Nancy

Mention « Pharmacie »

par

Georges LOISEAU

Pharmacien

Diplômé d'Optique

Diplômé de Microbiologie

Ex-Préparateur de Chimie Organique

né à Ligny, le 13 décembre 1914

SUR QUELQUES PROBLÈMES DE PHYSIQUE SE RAPPORTANT A LA PROTHÈSE AUDITIVE ET LEURS APPLICATIONS A LA MESURE DES CARACTÉRISTIQUES DES APPAREILS CORRECTEURS

soutenue le 21 Juin 1958, devant la Commission d'Examen

Président . . . . . M. le Doyen KAISER.

Juges . . . . . M. BERNANOSE, Professeur de Physique.

M. STEIMETZ, Professeur de Sciences Naturelles.

1958

Année 1957-1958 3e Série — N° 93

THÈSE

présentée

A LA FACULTÉ DE PHARMACIE DE NANCY

pour obtenir

Le Titre de Docteur de l'Université de Nancy

Mention « Pharmacie »

par

Georges LOISEAU

Pharmacien

Diplômé d'Optique

Diplômé de Microbiologie

Ex-Préparateur de Chimie Organique

né à Ligny, le 13 décembre 1914

R. UNIV. BIBLIOTHEEK LEIDEN

SUR QUELQUES PROBLÈMES DE PHYSIQUE SE RAPPORTANT A LA PROTHÈSE AUDITIVE ET LEURS APPLICATIONS A LA MESURE DES CARACTÉRISTIQUES DES APPAREILS CORRECTEURS

soutenue le 20 Juin 1958, devant la Commission d'Examen

Président . . . . . M. le Doyen KAISER.

Juges . . . . . M. BERNANOSE, Professeur de Physique.

M. STEIMETZ, Professeur de Sciences Naturelles.

1958

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41555802_0047

UNIVERSITÉ DE NANCY - FACULTÉ DE PHARMACIE

Administration

Doyen : F. KAISER
Assesseur : A. MEUNIER
Secrétaire : P. RADUREAU

PERSONNEL ENSEIGNANT

Professeurs

M.	MEUNIER A.	Pharmacie Galénique
Mlle	FRANÇOIS M.-Th.	Matière Médicale
MM.	KAISER F.	Chimie
	FRANQUET R.	Botanique
	MARCHAL J.-G.	Microbiologie
	STEIMETZ E.	Sciences Naturelles
	BLOCH J.-M.	Toxicologie
	SOLEIL J.	Pharmacie Chimique
	BERNANOSE A.	Physique

Maître de Conférences Agrégé

Mlle	BESSON S.	Pharmacodynamie

Chargés de Cours Complémentaires

M.	MEUNIER A.	Hydrologie
Mlle	FRANÇOIS M.-Th.	Hygiène
MM.	KAISER F.	Biochimie technique
	FRANQUET R.	Cryptogamie
	MARCHAL J.-G.	Parasitologie
	STEIMETZ E.	Mycologie-Minéralogie
	BLOCH J.-M.	Chimie Minérale
	SOLEIL J.	Chimie Organique
	ROBLOT R. (Professeur à la Faculté de Droit).	Déontologie
	ANZIANI P.	Caractères Analytiques des Sels
	MIRJOLET M.	Chimie Analytique

Chefs de Travaux

M.	ANZIANI P.	Chimie
Mme	LASSEUR A.	Microbiologie-Parasitologie
MM.	MIRJOLET M.	Sciences Pharmaceutiques
	BÉNÉ R. (Délégué)	Bactériologie et Parasitologie techn'ques
	PIERFITTE M. (Délégué)	Chimie Biologique
	VILLOUTREIX (Délégué)	Micrographie
	PELT J.-M. (Délégué)	Chimie Quantitative
	HARTEMANN G. (chargé de T. P.)	Physique.

Doyen honoraire : M. RICHARD, Recteur de l'Académie de Besançon.

Professeur honoraire : M. CORDEBARD.

A Monsieur le Professeur KAISER,

Qu'il veuille bien accepter nos remerciements pour l'honneur qu'il nous a fait en consentant à présider cette thèse, ainsi que l'expression de notre gratitude pour l'accueil qu'il a bien voulu réserver à nos travaux.

A notre Maître, Monsieur le Professeur BERNANOSE,

Nous exprimons notre respectueuse gratitude pour l'intérêt et la sympathie qu'il nous a témoignés depuis le jour de notre entrée dans son laboratoire.

Dans une discipline toujours en évolution, nous avons pu bénéficier auprès de lui à la fois de ses conseils éclairés et de ses remarquables qualités d'homme de science.

Qu'il veuille bien accepter avec nos hommages respectueux, l'expression de notre reconnaissance pour le travail effectué sous son aimable direction.

A Monsieur le Professeur STEIMETZ,

Qui nous a fait l'honneur de faire partie de notre jury, nous adressons nos remerciements et présentons l'hommage de notre gratitude pour les nombreuses marques d'intérêt et de sympathie que nous avons reçues de lui.

A tous mes Maîtres de la Faculté,

En hommage de reconnaissance pour leur enseignement.

A ma Mère,

« En témoignage de ma reconnaissance et de ma profonde affection ».

A mes Beaux-Parents.

A ma Femme et mes deux Fils.

A tous mes Parents.

A tous ceux qui m'honorent de leur amitié.

A Messieurs les préparateurs et employées de mon officine,

A Mademoiselle VUILLAUME,

Mademoiselle PIERSON, dactylo au Laboratoire de Physique,

Messieurs JACQUOT et DAGUET, mécaniciens aux ateliers de la Faculté.

En les remerciant de m'avoir facilité certaines tâches matérielles.

INTRODUCTION

De tout temps il y a eu des sourds, soit de naissance, soit à la suite d'une blessure ou d'une maladie, soit par vieillesse. Mais le nombre des sourds semble se multiplier actuellement par suite de l'augmentation du bruit qui suit la civilisation : T.S.F., moteurs de toutes sortes. D'où la multiplication des appareils de prothèse qui entraîne à son tour l'obligation d'un dépannage rapide car il s'agit d'appareils délicats ne pouvant généralement pas être réparés par les utilisateurs.

Pour répondre à cette nécessité les acousticiens doivent résoudre de nombreux problèmes du domaine de la physique, en s'appuyant sur l'anatomie et la physiologie et sans négliger la psychologie.

Psychologie du sourd.

Le sourd en effet n'apparaît comme un deshérité qu'aux yeux de quelques-uns car pour la grande majorité des hommes il n'est bien souvent qu'un sujet de plaisanteries faciles.

Nul n'ignore les particularités du caractère des sourds. Ils sont plus ou moins faciles à vivre, méfiants, sauvages. Mais leur psychologie nous est à peu près totalement inconnue.

Rares sont ceux qui prennent la peine d'essayer de se représenter ce que peuvent être les sensations et les pensées du sourd.

NAGER (21) l'a particulièrement bien montré sous son aspect médical et humain.

Inconvénients entraînés par la surdité.

La privation des sensations sonores entraîne en effet des inconvénients de tous ordres.

L'impossibilité de converser normalement le gênant dans l'exercice de sa profession, il peut perdre sa clientèle ou son emploi ou tout au moins être relégué à un poste inférieur à celui qui devrait être normalement le sien. Les conséquences pécuniaires ainsi entraînées affectent non seulement le sourd mais encore sa famille.

Au sein de cette dernière il est également gêné par son infirmité. L'éducation des enfants peut en partie lui échapper. Son autorité peut s'en trouver diminuée.

La conversation étant impossible, la culture et la distraction ne pourront être procurées que par la lecture puisque l'échange des idées est pratiquement interdit.

L'insécurité menaçant ainsi le sourd dans sa vie physique, morale et matérielle, des moqueries ayant pu accompagner ses erreurs dans la conversation, il se replie sur lui-même par sentiment d'infériorité et crainte du ridicule.

La possibilité d'une prothèse bien adaptée doit permettre de le faire sortir de son isolement et de le reclasser dans un monde d'où il s'était volontairement retiré.

Rôle du pharmacien à l'égard du sourd.

Toutefois la moindre panne tend à faire réapparaître une certaine inquiètude devant l'infirmité retrouvée.

Aussi la correction de la surdité ne peut-elle être confiée à un simple vendeur d'appareils mais au pharmacien qui est tout désigné pour ce rôle.

De par son contact journalier avec une clientèle de malades il connaît l'état d'esprit de ceux-ci et saura réserver au sourd « en panne » l'accueil compréhensif qui le rassurera.

De par les connaissances qu'il a acquises au cours de ses années de faculté et qu'il peut compléter en suivant les certificats universitaires d'acoustique récemment créés, le pharmacien pourra guider le sourd dans le choix de son appareil qui deviendra son médicament quotidien.

Il pourra de même en cas de panne s'efforcer de rechercher la cause de cette dernière et d'y porter remède.

C'est dans ce rôle que nous voulons apporter notre contribution par la réalisation de deux appareils, le lampemètre et le transistormètre, qui permettent de vérifier l'état des tubes et des transistors équipant les appareils de prothèse auditive.

Leur description sera précédée de chapitres préalables destinés à rappeler les connaissances physiques ou anatomiques dont les principes ont conduit à la réalisation des prothèses.

C'est ainsi que des notions générales sur le son suivies d'une étude de l'oreille et des différents types de surdité apportent les éléments de base ayant présidé à l'élaboration des prothèses auditives.

Ces dernières feront l'objet du troisième chapitre au cours duquel seront exposés l'historique de la prothèse et l'étude du transistor.

La description et le fonctionnement des appareils de mesure : lampemètre et transistormètre seront suivis d'un examen sur la modification éventuelle des caractéristiques qu'un long usage apporte aux appareils de prothèse.

CHAPITRE I

NOTIONS SUR LE SON

La sensation de « son » correspond à la perception de vibrations de nature mécanique situées dans un domaine de fréquences convenables que nous préciserons par la suite.

La simple observation visuelle suffit à montrer que des sources sonores solides, comme une cloche, un diapason ou une corde vibrante présentent, pendant que l'oreille perçoit les sons, des contours flous prouvant qu'ils sont entrés en vibration.

Si l'on veut donc préciser l'ensemble du phénomène, de sa production à sa perception, il faut considérer successivement :

1°) la production du son ;

2°) sa transmission par les divers milieux : gaz, solides et liquides ;

3°) sa perception.

A. — PROPAGATION DU SON.

On peut distinguer divers modes de propagation du son, soit dans les gaz ou les solides (modes extrêmes) soit dans les liquides (mode intermédiaire).

I. — Propagation du son dans les gaz.

D'après la théorie cinétique des gaz, ceux-ci sont constitués de molécules constamment en mouvement et relativement très éloignées les unes des autres. Dans le milieu vide où elles se déplacent librement, il leur arrive toutefois de se rencontrer et ceci

d'autant plus souvent qu'elles sont plus nombreuses, c'est-à-dire que la « pression » du gaz est plus élevée. Aux bases températures, et en particulier à la température ordinaire, on peut considérer, en première approximation tout au moins, que les chocs restent parfaitement élastiques.

Il en résulte que chaque molécule prise isolément et suivie au cours du temps, a pour trajectoire une ligne brisée dont les divers segments sont rectilignes.

On peut ainsi définir une vitesse quadratique moyenne, qui ne dépend que de la température et de la nature chimique du gaz. La pression sur les parois résulte de la somme de toutes les petites impulsions dues aux chocs des molécules sur ces parois.

Supposons maintenant que dans ce milieu où seules les lois du hasard régissent le comportement de chaque molécule, on introduise un dispositif capable de fournir une impulsion commune à tout un groupe de molécules, comme c'est le cas pour un corps solide en vibration. Le vecteur vitesse de chacune des molécules touchées devient la somme géométrique du vecteur vitesse en l'absence de perturbation (donc pour lequel toutes les directions sont également possibles) et du vecteur vitesse, orienté, dû à la perturbation

De ces considérations, on peut déduire ce qui suit :

a) Chaque molécule, au cours des chocs qu'elle subit, tend à se débarasser de sa composante anormale par dégradation progressive de la symètrie particulière introduite par la perturbation.

On peut alors dire que chaque molécule peut être considérée comme une « source secondaire » : c'est la transposition dans le domaine de l'acoustique du principe d'Huyghens en optique.

Comme ce principe explique les prénomènes de diffraction en optique, cette façon de voir permettra de comprendre pourquoi le son a la propriété de contourner les obstacles. Pour préciser, il faudra, comme en optique, définir la longueur d'onde, ce que nous ferons plus tard, et comparer celle-ci aux dimensions des obstacles. On comprendra alors pourquoi la diffraction des sons est, à notre échelle, beaucoup plus grande que celle de la lumière.

b) Puisque ce sont les molécules qui transmettent les effets de la perturbation, ceux-ci vont donc se propager à une vitesse voisine de celle de la vitesse quadratique moyenne des molécules dans la mesure toutefois où ce supplément de vitesse acquis reste assez petit.

Ainsi la vitesse du son dans un gaz est voisine de la vitesse quadratique des molécules du gaz et dépend comme elle de la température.

c) A une perturbation mécanique donnée (source sonore) est également liée une variation de pression.

Pour le montrer, considérons le cas particulièrement simple d'un élément de surface S (figure 1) où les molécules recevraient au cours de cette traversée un supplément de vitesse Δv :

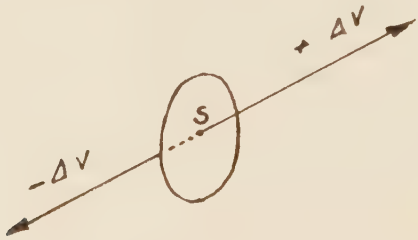


Figure 1

A tout instant les molécules qui traversent S ont donc leur vitesse propre, soit augmentée, soit diminuée de Δv, suivant le sens de passage. La pression étant liée à la vitesse, il y a donc surpression d'un côté de la surface et dépression de l'autre côté.

Enfin, d'après les remarques précédentes, la variation de pression va ensuite se propager. D'ailleurs, il faut remarquer qu'il s'agira de la propagation d'une vibration « longitudinale ».

d) Comme les molécules restent toujours indépendantes les unes des autres et qu'après avoir cédé aux voisines leur excèdent de vitesse elles reprennent leur état normal, il ne peut naître d'oscillations dans le milieu. On n'observera donc pas au sein d'un gaz, supposé seul, de vibrations naturelles s'il n'y a pas de source permanente : le son disparaît dès que la cause qui lui a donné naissance a disparu.

II. — **Propagation du son dans les solides.**

Dans de tels milieux chaque molécule ou atome a sa place bien déterminée. De légers écarts sont toutefois possibles, mais alors naît simultanément une force de rappel qui croît en même temps que le déplacement. Le plus souvent on peut considérer cette force comme proportionnelle au déplacement. Généralisée à l'ensemble du corps solide, cette propriété est connue sous le nom « d'élasticité ». D'ailleurs il s'y ajoute aussi un certain « jeu » entre les molécules.

On peut se représenter à notre échelle les corps solides, en imaginant un système de boules A, B, C, D...., réunies entre elles par des ressorts de rappel r_1, r_2, r_3, etc... (figure 2).

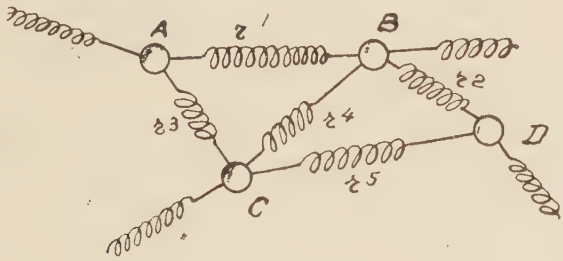


Figure 2

En première approximation, il est possible d'écrire qu'entre deux molécules voisines A et B s'exercent des forces réciproques F du type :

$$F = -K\,x \qquad (1)$$

où K est une constante et x l'écart par rapport à la position d'équilibre.

Lorsqu'un son vient frapper un solide, chaque molécule mise en mouvement transmet ainsi son énergie cinétique aux molécules voisines.

On s'explique ainsi les caractéristiques suivantes :

a) La propagation ne peut pas être instantanée : l'élasticité crée en effet un certain retard de transmission. De sorte que plus un milieu est rigide, donc moins il est élastique, plus la vitesse de propagation est grande.

b) Toute molécule déplacée de sa position d'équilibre, en particulier par un choc, tend à y revenir, mais en subissant des oscillations naturelles, dont la période est liée aux forces élastiques. Ces oscillations engendrent un son caractéristique.

c) Par suite de l'orientation diverse des forces de liaison entre les molécules, les vibrations qui se produisent tout d'abord dans la direction du choc initial, donnent rapidement naissance à des vibrations transversales chez les molécules voisines.

III. — **Propagation du son dans les liquides.**

Cet état de la matière s'apparente, comme on sait, à l'état gazeux par la liberté relative des molécules de sorte qu'il ne peut pas s'y produire de vibrations naturelles comme dans les solides. Mais comme les liquides sont des milieux condensés, la fréquence des chocs élastiques entre molécules est beaucoup plus grande que celle des chocs dans les gaz.

Les liquides apporteront donc un retard à la propagation dû surtout à l'élasticité, tandis que dans les gaz la vitesse de propagation était surtout liée à la vitesse des molécules.

Ces raisonnements permettent également de comprendre qu'il puisse se produire à la surface de séparation de deux milieux, comme en optique, des phénomènes de réflexion et de réfraction.

B. — APPLICATION A L'ACOUSTIQUE PHYSIOLOGIQUE

I. — **Perception du son.**

Elle sera étudiée page 30, mais précisons dès maintenant qu'on retrouve ces divers modes de propagation du son. Habituellement le son parvient à l'oreille par suite de sa propagation dans l'air ambiant ; dans des cas très particuliers, il peut lui parvenir par l'eau (plongée) ou par un solide si l'oreille est appliquée contre un mur, contre le sol ou sur un rail.

A l'intérieur de l'oreille on retrouve aussi les trois modes de conduction gaz, solide et liquide. La réception du son se fait généralement par voie aérienne, mais aussi partiellement par la conduction des os du crâne.

Lorsque le premier mode de réception est altéré, il est des cas où la prothèse auditive en est réduite à utiliser totalement le second mode.

II. — Les ondes sonores.

La transmission du son est liée à un transport d'énergie qui se réalise par des variations de pression. C'est ainsi qu'on peut parler d' « ondes ». (*)

Les surfaces d'onde seront le plus souvent sphériques. Elles deviennent planes lorsque la source est suffisamment éloignée du lieu d'observation. C'est d'ailleurs ce dernier cas que nous examinerons plus particulièrement à cause de son importance pratique.

La propagation du son par ondes planes.

C'est le cas de la propagation dans un tuyau cylindrique, que nous supposons ici, pour simplifier, de section unité.

Une tranche de fluide limitée par les plans A et A' et d'épaisseur dx (figure 3) de masse spécifique ρ, a donc une masse totale de :

$$m = \rho \, dx \qquad (2)$$

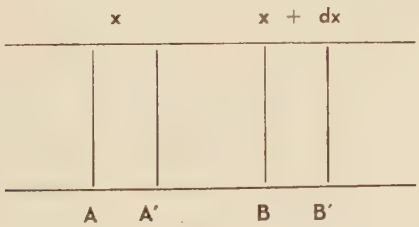


Figure 3

Par un calcul classique on peut lui appliquer l'équation fondamentale de la dynamique :

$$F = m \, \gamma \qquad (3)$$

F étant la force agissante et γ l'accélération.

(*) Les termes utilisés ici ont été choisis pour être conformes au « Vocabulaire électrochimique normalisé » (26).

Si u est le déplacement de la tranche à l'instant t, la vitesse est $\frac{\delta u}{\delta t}$ et l'accélération $\frac{\delta^2 u}{\delta t^2}$, tandis que la force totale est la différence des pressions agissant sur les deux faces de la tranche.

Si donc la pression initiale était p_0 et si p est la pression à l'instant t dans le plan A, on peut écrire que la variation relative du volume $\frac{\Delta v}{v_0}$ du volume initial v_0 est sensiblement proportionnelle à la variation de pression :

$$\frac{\Delta v}{v_0} = - K \Delta p \qquad (4)$$

La différence des pressions entre A et A' est :

$$- \frac{\delta}{\delta x} (\Delta p) \, dx$$

ou en fonction de (4) :

$$\frac{1}{K} \frac{\delta}{\delta x} \left(\frac{\Delta v}{v_0}\right) dx$$

Mais comme $\frac{\Delta v}{v_0}$ est fonction du déplacement u

$$\frac{\Delta v}{v_0} = \frac{\delta u}{\delta x} \qquad (5)$$

d'où la force cherchée F :

$$F = - \frac{\delta}{\delta x} (\Delta p) \, dx = \frac{1}{K} \frac{\delta^2 u}{\delta x^2} dx \qquad (6)$$

et l'équation du mouvement cherchée (3) devient alors :

$$\frac{1}{K} \frac{\delta^2 u}{\delta x^2} dx = \rho \, dx \frac{\delta^2 u}{\delta t^2} \qquad (7)$$

ou en posant :

$$c^2 = \frac{1}{\rho K} \qquad (8)$$

$$\boxed{\frac{\delta^2 u}{\delta t^2} = c^2 \frac{\delta^2 u}{\delta x^2}} \qquad (9)$$

On peut retrouver la même équation en considérant cette fois, les pressions. En effet, les relations (4) et (5) permettent d'écrire :

$$\Delta p = - \frac{1}{K} \frac{\delta u}{\delta x} \qquad (10)$$

de sorte qu'en multipliant les deux membres de (9) par $\frac{\delta u}{\delta x}$

$$\frac{\delta^2 u}{\delta t^2} \frac{\delta u}{\delta x} = c^2 \frac{\delta^2 u}{\delta x^2} \frac{\delta u}{\delta x} \qquad (11)$$

on voit apparaître la relation :

$$\frac{\delta^2 (\Delta p)}{\delta t^2} = c^2 \frac{\delta^2 (\Delta p)}{\delta x^2} \qquad (12)$$

c'est-à-dire, puisque $\Delta p = p - p_0$

$$\boxed{\frac{\delta^2 p}{\delta t^2} = c^2 \frac{\delta^2 p}{\delta x^2}} \qquad (13)$$

Les relations (9) et (13) montrent que u et p suivent les mêmes lois. Du type classique, ces équations ont pour solution des fonctions du type :

$$\boxed{u = f\left(t - \frac{x}{c}\right) + h\left(t + \frac{x}{c}\right)} \qquad (14)$$

Les deux fonctions f et h correspondent évidemment à deux ondes se propageant en sens inverse.

Pour l'une comme pour l'autre, il apparaît que c'est bien la vitesse de propagation du son, désignée souvent maintenant sous le nom de « célérité », afin d'éviter les confusions avec les vitesses des particules.

Le cas examiné est celui des fluides en général, mais on sait que dans le cas des gaz, le phénomène étant adiabatique, on peut écrire pour un gaz parfait :

$$p\, v^{\gamma} = \text{constante} \qquad (15)$$

d'où on peut déduire, par un calcul simple, la formule bien connue :

$$c = \sqrt{\frac{R\,T\,\gamma}{M}} \qquad (16)$$

où γ est le rapport de la chaleur spécifique à pression constante à la chaleur spécifique à volume constant.

III. — Les sons purs.

On peut s'attacher ici à l'étude des seules vibrations sinusoïdales qui sont les plus simples parce qu'à ce type de vibrations on peut rattacher toutes les autres qui sont également périodiques Le théorème de FOURRIER indique en effet que toute vibration périodique peut être décomposée en une somme de vibrations sinusoïdales.

Nous considérerons donc la vibration du type :

$$u = a \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{x}{c}\right) \qquad (17)$$

où a est une constante, T la période, t le temps, x la distance à la source et c la vitesse de propagation. Pour simplifier nous supposons ici que a n'est pas fonction de x, c'est-à-dire que les ondes sont planes, ce qui est le cas presque général dans la pratique où les déplacements de l'observateur restent petits devant la distance à la source.

De la formule (17) on déduit la longueur d'onde :

$$\lambda = c\ T \qquad (18)$$

1°) Energie et intensité du son.

Le son se traduisant à la fois par une viariation périodique de pression et de vitesse des particules, on peut donc considérer les énergies potentielle et cinétique correspondantes, comme on le fait dans le cas élémentaire du pendule. On trouvera le détail du calcul dans l'ouvrage de CONTURIE (8), auquel nous empruntons par ailleurs d'autres résultats de ce chapitre.

Dans le cas de la vibration sinusoïdale, la valeur moyenne de l'énergie totale E pendant une période est :

$$E = \rho \frac{W_0\ a^2\ \omega^2}{2} \qquad (19)$$

où ρ est la masse spécifique, W_0 le volume considéré et ω la pulsation ($\omega = \frac{2\pi}{T}$).

Il y correspond donc une densité moyenne d'énergie (énergie par unité de volume) :

$$e = \rho \frac{a^2 \omega^2}{2} \qquad (20)$$

Il devient ainsi possible de définir physiquement l'intensité de son par le flux d'énergie qui traverse en une seconde l'unité de surface :

$$I = e\ c \qquad (21)$$

ce qui donne, tous calculs faits :

$$\boxed{I = \frac{1}{2} V \Delta p} \qquad (22)$$

où V et Δp sont respectivement les amplitudes des variations de vitesse et de pression.

Au cas où l'onde serait sphérique, la formule (22) devient :

$$\boxed{I = \frac{1}{2} \rho \frac{\omega^2 A^2 c}{r^2}} \qquad (23)$$

où r est la distance à la source, A étant l'amplitude de la source.

2°) **Autres caractéristiques du son.**

a) **Réflexion et réfraction du son.**

On peut raisonner sur le son comme sur toute autre vibration et définir deux coefficients lorsque le son arrive à la surface de séparation de deux milieux différents :

Un coefficient de réflexion : $R = \dfrac{\text{intensité réfléchie}}{\text{intensité incidente}}$ (24)

Un coefficient de transmission : $T = \dfrac{\text{intensité réfractée}}{\text{intensité incidente}}$ (25)

Ces coefficients jouent un rôle important dans toutes les installations acoustiques, notamment lorsqu'il s'agit d'éliminer les échos et les interférences qu'ils sont susceptibles de produire.

b) **Interférences et ondes stationnaires.**

Par analogie également avec les autres vibrations, on comprendra qu'il puisse se produire des interférences et des ondes stationnaires lorsque des ondes sonores différentes se rencontrent avec leurs propres ondes réfléchies.

c) **Absorption du son dans les milieux homogènes.**

Au cours de sa propagation le son se trouve peu à peu absorbé. Les calculs précédents supposaient les gaz parfaits, c'est-à-dire sans frottements internes entre couches voisines de gaz, et les transformations parfaitement adiabatiques. Ce n'est pas absolument le cas réel, où l'on observe un affaiblissement augmentant avec la fréquence du son. On peut, comme dans le cas de la lumière par exemple, définir pour le milieu et la vibration considérée un coefficient α tel que l'intensité sonore soit du type : $I\, e^{-2\alpha x}$

Le coefficient α est plus grand dès qu'il s'agit d'un mélange de gaz et c'est notamment le cas de l'air humide.

C. — PRODUCTION et RÉCEPTION DU SON.

Dans presque tous les cas pratiques de production du son on trouve à l'origine un corps solide animé d'un mouvement vibratoire en contact avec l'air.

Ce mouvement peut être :

1) forcé, dans le cas d'une membrane d'écouteur ou de haut-parleur ;

2) obtenu par résonance, dans le cas habituel des instruments de musique.

Dans le premier cas, la résonance doit être évitée en général, sous peine de déformation de la reproduction. Dans le second, au contraire, c'est la résonance qui permet l'économie d'énergie.

Nous allons maintenant considérer le cas du résonateur acoustique constitué par un récipient en forme de flacon ce qui va nous permettre par la suite de rappeler le fonctionnement physique de l'oreille.

Soit donc le résonateur représenté en coupe par la figure 4 :

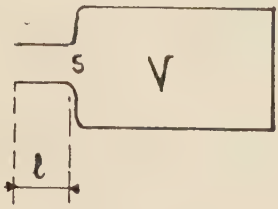


Figure 4.

Il présente la forme d'un flacon de volume intérieur V avec un goulot de section s et de langueur l. La tranche d'air qui est contenue dans le goulot est mise en mouvement sous l'influence d'une force instantanée,

$$F = m\gamma = \rho \quad s\,l \frac{dv}{dt} \qquad (26)$$

ρ étant la masse spécifique de l'air.

Cette force F est par ailleurs :

$$F = s \quad dp \qquad (27)$$

Mais l'air du récipient ne se déplace que d'une façon insignifiante à cause du grand volume de la cavité ; il subit aussi de petites variations de pression, périodiques, que l'on peut relier aux propriétés des gaz :

$$p \quad v^{\gamma} = \text{constante} \qquad (28)$$

c'est-à-dire :

$$\frac{dp}{p_0} = \gamma \frac{dV}{V} \qquad (29)$$

avec ici :

$$dV = \int s \; v \; dt \qquad (30)$$

Il devient ainsi possible d'exprimer dp en fonction de dv dans les équations (26) et (27) :

$$dp = \frac{\gamma \; p_0}{V} \int s \; v \; dt \qquad (31)$$

et ainsi :

$$\rho \; s\,l \frac{dv}{dt} + \frac{\gamma \; p_0 \; s^2}{V} \int dt = 0 \qquad (32)$$

En dérivant :

$$\rho l \frac{d^2 (sv)}{dt^2} + \frac{\gamma p_0 s}{V} (sv) = 0 \qquad (33)$$

Nous avons là une équation différentielle où nous avons fait apparaître comme variable sv, qui n'est autre que le débit gazeux dans le goulot.

Cet artifice de calcul permet de faire un rapprochement avec l'équation d'un circuit oscillant pur, c'est-à-dire constitué uniquement par une self et un condensateur réunis par des fils de connexion de résistance négligeable (figure 5) :

Figure 5

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{1}{C} i = 0 \qquad (34)$$

où L est la self et C la capacité.

L'analogie formelle entre (33) et (34) fait ainsi correspondre le débit de gaz sv à l'intensité du courant i.

Tandis que (34) admet pour solution la vibration de pulsation :

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L C}} \qquad (35)$$

l'équation acoustique indique la pulsation correspondant à la résonnance acoustique :

$$\omega = \sqrt{\frac{\gamma p_0 s}{\rho l V}} \qquad (36)$$

On généraliserait cette analogie formelle en faisant intervenir la résistance dans le cas du circuit électrique et la « résistance »

caractérisant les frottements et le rayonnement extérieur, dans le cas du résonateur acoustique, ce qui aurait pour effet d'introduire dans les équations (33) et (34) respectivement un terme en

$$\frac{d\,(sv)}{dt} \quad \text{et} \quad \frac{d\,i}{dt}$$

On montrerait que, par analogie avec le circuit électrique considéré, un résonateur acoustique, comme tout autre système mécanique vibratoire, peut fournir des vibrations périodiques amorties ou bien entretenues, mais avec résonance pour la fréquence propre du système.

Alors que le débit du gaz correspond, comme nous venons de le voir, à l'intensité, p, la pression correspond précisément à la différence de potentiel électrique.

D. — IMPÉDANCE ACOUSTIQUE.

Comparer le débit d'un gaz à l'intensité d'un courant alternatif et la pression à sa différence de potentiel revet une importance fondamentale car elle permet par analogie de définir une « impédance acoustique » :

$$Z = \frac{p}{S\,v} = \frac{\text{pression}}{\text{débit}} \qquad (37)$$

correspondant à l'impédance électrique E/I. Dans les deux cas, l'impédance est fonction de la fréquence.

Ainsi aurons-nous la possibilité en acoustique de faire l'économie de raisonnements directs complexes, ou tout au moins peu habituels, simplement en substituant une image électrique au schéma acoustique. Et ceci est particulièrement utile dès qu'on envisage un « circuit » pour la propagation du son, comme c'est le cas, notamment à l'intérieur de l'oreille.

Un simple tuyau est alors assimilable à une ligne électrique où le débit Sv se conserve. S'il y a bifurcation, la somme algébrique des débits dans chaque branche est nulle, comme la somme algébrique des intensités en un nœud de courant. De même, les pressions sont obligatoirement les mêmes à chaque entrée de tuyau, comme les potentiels.

En greffant sur les parois d'un tuyau étroit des résonateurs à large col, on a l'équivalent de deux lignes électriques parallèles réunies par des condensateurs, dispositif qui arrête les fréquences élevées ainsi court-circuitées : c'est le filtre « passe-bas ».

Au contraire, si on greffe sur un tuyau large des ouvertures étroites celles-ci jouent le rôle de selfs et ce sont au contraire les fréquences basses qui seront court-circuitées : c'est le filtre « passe-haut ».

Application aux pavillons.

Une application particulièrement importante ici est constituée par les conduits coniques ou « pavillons ». Ce qui caractérise ce dispositif est donc une section proportionnelle à la distance au sommet. On utilise en fait un tronc de cône limité par les sections S_1 et S_2.

Les impédances à l'entrée et à la sortie sont donc respectivement :

$$Z_1 = \frac{p_1}{s_1 \; v_1} \quad \text{et} \quad Z_2 = \frac{p^2}{s_2 \; v_2}$$

mais, comme le rapport pression/vitesse reste constant, il en résulte que :

$$Z_1 \; s_1 = Z_2 \; s_2 \qquad (38)$$

Ainsi, dans un pavillon, l'impédance varie en raison inverse de la section et l'appareil n'est autre qu'un adaptateur d'impédance.

Cette propriété se conserve sensiblement, même si on donne toutes sortes de forme au pavillon, en l'enroulant et même en le coudant, ce qui fait qu'on trouve là le principe des premiers dispositifs correcteurs de la surdité.

CHAPITRE II

NOTIONS SUR L'OREILLE ET LES DIFFERENTS TYPES DE SURDITÉ

I. — NOTIONS SUR L'OREILLE

Pour faciliter l'intelligibilité de ce qui va suivre, nous pensons devoir rappeler brièvement quelques notions classiques sur l'anatomie de l'oreille.

A. — DESCRIPTION DE L'OREILLE.

On distingue habituellement trois parties distinctes, auxquelles s'attachent, comme nous le verrons, trois types d'action physiques différents :

1°) **L'oreille externe** constituée par :

a) LE PAVILLON,

b) LE CONDUIT AUDITIF OU CONDUIT ACOUSTIQUE EXTERNE.

2°) **L'oreille moyenne** qui comprend :

a) LE TYMPAN,

b) LA CAISSE DU TYMPAN,

c) LA CHAINE DES OSSELETS.

3°) **L'oreille interne,** cavité remplie de liquide, constituée par :

a) LES CANAUX SEMI-CIRCULAIRES,

b) LE LIMAÇON EN RELATION AVEC LE NERF AUDITIF.

1°) **L'Oreille externe.**

C'est la partie directement en contact avec l'air extérieur. Le **pavillon** de l'oreille humaine a une forme compliquée formant une

sorte de cornet acoustique. ABOULKER (1), auquel nous empruntons par ailleurs d'autres précisions dans ce chapitre, assimile le pavillon

Figure 6

1. Pavillon
2. A Conduit Acoustique
3. B Tympan
4. C Chaîne des Osselets
5. D Fenêtre ovale
E. Fenêtre ronde
6. Canaux semi-circulaires
7. Utricule
8. Saccule
9. F Limaçon
10. Trompe d'Eustach
G Membrane basilaire

à un ensemble de « deux demi-conques inégales, la postérieure plus grande, concave en avant, l'antérieure plus petite, disposée en sens inverse ». Le pavillon intervient notamment dans l'appréciation de la direction du son car on a observé que le fait de supprimer ses reliefs en mettant de la cire dans les cavités diminuait la faculté de trouver la direction du son.

Le **conduit acoustique** représenté en coupe par la figure 6 a 25 mm. de long et 7 mm. de large ; il présente quelques sinuosités. Il se comporte sensiblement comme un résonateur de même longueur.

2°) **L'Oreille moyenne.**

Elle est séparée de l'oreille externe par le **tympan,** qui se présente comme une membrane élastique, sensiblement ronde, fermant le conduit acoustique. Il est constamment tendu et présente une certaine rigidité.

Il bouche ainsi la **caisse du tympan,** cavité à l'intérieur des os du crâne, pleine d'air, mais en relation intermittente avec l'air extérieur par la trompe d'Eustache, ceci notamment au moment de la déglutition. Ainsi la pression est sensiblement la même sur les deux faces du tympan.

La **chaîne des osselets** est composée de trois os minuscules. Le premier, le marteau, la fixe au tympan. Le dernier, l'étrier, bouche la **fenêtre ovale** qui limite l'oreille interne. L'ensemble joue sensiblement le rôle d'un système de leviers amplifiant les pressions reçues au départ dans un rapport de 60/1.

En réalité, ce mécanisme est relativement complexe et dans l'oreille humaine il constitue en outre un système de sécurité en défendant l'oreille interne contre l'arrivée de sons trop intenses, qui ne sont pas transmis intégralement.

3°) **L'Oreille interne.**

L'oreille interne ou labyrinthe est, à l'intérieur du rocher, une cavité de forme compliquée, remplie de liquide. On y trouve :

l'utricule et le **saccule** qui sont des poches réunies entre elles la première étant en relation avec la fenêtre ovale ;

en relation avec l'utricule, les trois **canaux semi-circulaires** qui sont le siège de l'équilibre ;

le **limaçon** constitué par une sorte de sac allongé en forme de coquille d'escargot, communiquant avec l'utricule par la **fenêtre ovale** et munie d'une membrane très fine, la **fenêtre ronde,** jouant le rôle de soupape. Il est séparé suivant sa longueur par une membrane triangulaire, ou membrane basilaire, finement striée, à laquelle aboutissent les ramifications du nerf acoustique.

B) INTERPRÉTATION PHYSIQUE DU FONCTIONNEMENT DE L'OREILLE.

De cette rapide description, on peut déduire un schéma physique où sera utilisée la notion d'impédance acoustique précédemment introduite (formule 37, page 25).

Celle-ci peut aussi s'écrire, par analogie avec l'impédance électrique :

$$Z = \sqrt{r^2 + \left(\omega m - \frac{\sigma}{\omega}\right)^2}$$

où r est le frottement, m la masse et σ la rigidité.

Les ondes sonores transmises par le conduit acoustique mettent donc le **tympan** en vibrations forcées. L'impédance de ce dernier a pu être déterminée expérimentalement (CONTURIE, 8) et s'est montrée être voisine de celle de l'air dans un domaine de fréquences compris entre 800 et 1.000 périodes.

En dehors de ces fréquences, l'impédance du tympan étant plus élevée, son adaptation à l'air est presque parfaite à l'intérieur de la zone indiquée.

La **chaîne des osselets** multiplie les variations de pression aux dépens des déplacements, donc ici des vitesses. D'après la formule 37 l'impédance est donc beaucoup plus grande à la sortie de ce système qu'à l'entrée.

Le liquide contenu dans le **limaçon** reçoit ainsi des pressions variables et, suivant les fréquences, il agit en des points particuliers de la **membrane basilaire,** d'où les vibrations sont transmises au cerveau.

Pour expliquer la localisation sur la membrane en fonction de la fréquence, HELMHOLTZ avait admis un mécanisme par résonance, la longueur des stries de cette membrane étant régulièrement croissante d'une extrémité à l'autre. Cette théorie se heurtait à l'obstacle de la différence des ordres de grandeur entre les longueurs d'onde des sons et les longueurs des stries correspondantes.

Les expériences de BEKESY (18) laissent supposer que dans le liquide du limaçon des tourbillons apparaissent de part et d'autre de la membrane. Ces tourbillons se localiseraient sur les deux surfaces à une hauteur qui est caractéristique de la fréquence.

Ainsi peut-on faire correspondre à la coupe de l'oreille, un équivalent physique (figure 6), constitué d'abord par un conduit A fermé par le tympan qui agit sur la fenêtre ovale E par l'intermédiaire d'un adaptateur d'impédance ; enfin par le limaçon où se forment les tourbillons perçus par le nerf acoustique.

L'oreille apparaît ainsi du point de vue physique, d'une part comme un adaptateur d'impédance (air-liquide) constitué surtout par l'oreille moyenne, d'autre part comme un traducteur de sons en sensations, discriminateur de fréquences (oreille interne).

Si l'on considère que le sens du toucher, sensible aux pressions, ne l'est pas suffisamment pour percevoir les vibrations sonores ordinaires, l'oreille peut apparaître d'un certain point de vue comme une spécialisation locale très poussée de ce sens, mais orientée vers les pressions alternatives avec détermination de leur fréquence.

Le calcul montre que, sans adaptateur d'impédance, l'énergie sonore transmise de l'air à l'eau ne serait guère, pour les fréquences moyennes, que le 1/1.000 de l'énergie incidente (18) : c'est l'oreille moyenne qui donne l'augmentation considérable de sensibilité ainsi obtenue. En fait l'oreille moyenne n'existe que chez les vertébrés aériens.

Pour caractériser l'oreille sous son aspect purement physique nous aurons donc à considérer surtout le rôle de la fréquence sur la sensation sonore.

C) SENSIBILITÉ DE L'OREILLE ET FRÉQUENCES.

On sait tout d'abord que l'oreille permet d'évaluer les rapports de fréquences, ce qui est le cas en musique, avec une précision

de 1 %. Mais elle peut situer assez bien les sons purs dans l'échelle absolue des fréquences. C'est ainsi que les musiciens parlent de la « hauteur » des sons. En outre, pour deux sons impurs de même fréquence, les sensations diffèrent par le « timbre », qui est fonction de la proportion des harmoniques.

1) **Courbe de seuil et de douleur.**

Nous limitant ici au cas des sons purs, rappelons qu'il existe pour chaque fréquence une intensité minima ou « seuil » à partir de laquelle le son commence à être perçu et une intensité à partir de laquelle le son produit pour l'oreille une sensation d'abord pénible puis dangereuse. Ces deux limites sont fonctions de la fréquence et on peut ainsi tracer la courbe de seuil et celle de douleur (figure 7).

On utilise des échelles logarithmiques pour les deux grandeurs du fait que l'oreille suit la loi de WEBER-FECHNER, c'est-à-dire que la variation relative de pression $\frac{\Delta p}{p}$ perceptible par l'oreille est constante et égale à 0,1 ceci entre 100 et 4.000 périodes. On traduit ce fait en disant que la «sensation croît comme le logarithme de l'excitation ».

On obtient ainsi le diagramme de la figure 7 emprunté à CONTURIE (8).

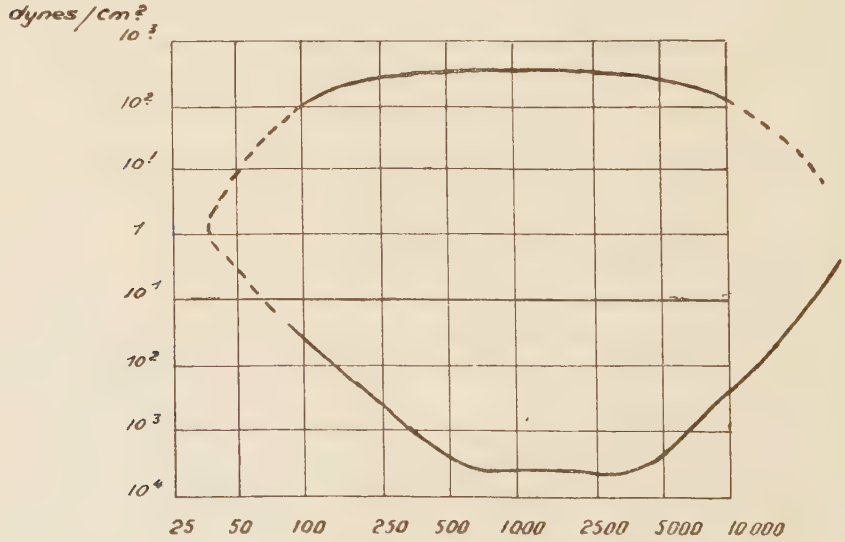


Figure 7. — Courbes de seuil et de douleur.

En réalité, il est plus pratique de se référer à une fréquence de base, choisie au voisinage du minimum de la courbe de seuil, la fréquence 1.000, et de définir pour cette fréquence des « niveaux » dans l'échelle logarithmique, exprimés en décibels à partir de l'intensité seuil.

On se rappellera que deux sons de même fréquence mais d'intensité inégale diffèrent de 1 Bel (B) lorsque le rapport de leur intensité est de 10 et d'un décibel (db) lorsque le logarithme de leur rapport est de 0,1, c'est-à-dire sensiblement 1,259.

2) **Audiogramme.**

Si on considère maintenant les différentes fréquences, l'oreille présente pour chacune d'elles un seuil particulier à partir duquel il est possible de définir en décibel leurs diverses intensités.

On a ainsi le moyen, par le graphique de l'audiogramme que nous allons développer, de chiffrer la sensibilité de l'oreille humaine moyenne et par là d'évaluer les altérations qu'elle peut subir chez certains individus.

Toutefois, cette représentation obtenue avec l'audiogramme ne coïncide avec la courbe de seuil (fig. 7) correspondant à la même sensation d'intensité que dans le centre de l'audiogramme pour la fréquence 1.000 Hz.

a) Principe de l'audiogramme.

Un générateur de fréquences envoi tour à tour dans chacune des deux oreilles des sons purs au moyen d'un écouteur appliqué sur l'oreille ou d'un vibrateur placé sur l'apophyse mastoïde.

Exprimé en db, l'intensité pour chaque fréquence croît d'une façon continue jusqu'au moment où l'oreille du sujet examiné commence à percevoir le son.

En abscisse sont portées les différentes fréquences à étudier et en ordonnée, exprimées en db, les différentes valeurs de l'intensité. Il est donc possible d'obtenir pour chaque fréquence l'intensité nécessaire à une perception sonore pour une oreille donnée. Le seuil

de perception pour la fréquence considérée est représenté par le point d'intersection des axes de fréquence et d'intensité.

En réunissant ces différents points entre eux, on obtient une courbe représentant le seuil d'audition minimum d'une oreille.

Pour faciliter une meilleure représentation graphique, les audiomètres de laboratoire sont calibrés de manière à donner pour chaque fréquence des pertes en db par rapport à une audition normale supposée entendre toutes les fréquences à 0 db. On arrive donc à un audiogramme inversé par rapport à celui précédemment décrit. C'est l'audiogramme dit américain, représentation maintenant adoptée internationalement.

b) Eléments de l'audiogramme.

Les principaux éléments de l'audiogramme comportent :

1°) la courbe aérienne.

2°) la courbe osseuse absolue.

3°) la courbe osseuse relative.

4°) le recrutement.

5°) l'épreuve de WEBER.

1°) La courbe aérienne.

Le son parvient au conduit auditif par un écouteur appliqué sur chacune des oreilles. La perception des fréquences est assurée par les vibrations de l'air contenu dans le conduit auditif qui agissent sur le tympan. La courbe aérienne est obtenue par la pratique des mesures subjectives précédemment indiquées.

La courbe osseuse est obtenue en substituant aux écouteurs un vibrateur que l'on place sur l'apophyse mastoïde droite et gauche. Les vibrations de cet appareil sont transmises à cet os qui les répercute à l'oreille interne.

2°) La courbe osseuse absolue ou C.O.A.

Elle est obtenue en obturant le conduit auditif de l'oreille interrogée et en assourdissant l'autre oreille pour éviter la centrolatéra-

lisation du son. Seule l'oreille interne du côté malade est interrogée par conduction osseuse.

3°) La courbe osseuse relative ou C.O.R.

Elle est obtenue sans obturer le conduit auditif. L'oreille entend par l'intermédiaire des os du crâne mais elle peut percevoir aussi les sons du vibrateur par la voie aérienne.

4°) Le recrutement.

L'oreille perçoit plus fort qu'elle ne devrait entendre par rapport à son seuil de perception. Des distorsions de la sensation d'intensité se produisent, distorsions qui sont mises en évidence par l'épreuve de FOWLER.

Cette épreuve consiste à faire entendre alternativement à chaque oreille un son de même fréquence jugé d'intensité identique par le sourd.

En augmentant l'intensité de ce son de 10 db par exemple, la sensation sonore devrait être à nouveau jugée la même. S'il y a recrutement il devient nécessaire d'ajouter à une des deux oreilles 10 db, par exemple, pour rétablir l'égalité subjective de sensation sonore.

5°) Epreuve de WEBER.

Cet examen consiste à rechercher la latéralisation du son au moyen d'un vibrateur placé au milieu du front. Le sourd indique pour les différentes fréquences perçues si le son lui semble venir de droite ou de gauche.

Il existe d'autres tests audiométriques, tels RINNE, GELLE, etc., qui sont définis, en particulier, dans l'ouvrage de DEHAUSSY (9) cité par ailleurs.

L'audiogramme constitue le test audiométrique le plus important. Il apporte de précieux renseignements sur la situation de la lésion dans l'oreille. Cependant il ne donne généralement pas d'indication sur le choix d'une prothèse éventuelle.

VAYSETTE (25) a précisé les qualités qui doivent être retenues en vue du choix d'un audiomètre destiné à ces examens particuliè-

rement délicats puisqu'ils comportent une part importante d'impressions subjectives.

II. — LES DIFFÉRENTS TYPES DE SURDITÉ

Certains ouvrages anciens traitant de la surdité la résument ainsi : « SURDITAS EST UNA ET CENTUPLEX », une infirmité aux aspects multiples.

Dès lors, il semblerait logique de rechercher une classification qui tienne compte de l'étiologie de ces diverses surdités.

Or, d'après R. BOURGEOIS (3) les classifications purement étiologiques comme celles d'ESCAT ne sont guère pratiques. Elles aboutissent à former des sous-groupes d'importance extraordinairement inégales et elles ont créé une quantité de néologismes destinés à masquer souvent une ignorance réelle.

Tout le monde s'accorde maintenant, semble-t-il, pour diviser les surdités en trois groupes : transmission, perception et mixte et nous croyons qu'il convient de garder ce schéma.

Cette classification schématique des différents types de surdité sera le trait d'union indispensable entre le médecin et l'acousticien puisqu'elle va constituer en quelque sorte le bref résumé de son diagnostic et l'ébauche d'une première orientation sur le choix d'une éventuelle prothèse.

Il faudra toujours garder présent à l'esprit que cette façon de voir sera forcément plus théorique que pratique et qu'elle est destinée à donner une compréhension plus facile aux aspects si variés de la surdité.

Nous avons emprunté à SAIAG (24) l'exposé schématique qu'il a fait sur la classification et l'étiologie des différentes surdités.

A. — SURDITÉ DE TRANSMISSION.

La faculté d'interprétation des sons n'est pas atteinte. Seul l'appareil de transmission est en cause parce que, soit au niveau du conduit auditif externe, soit au niveau des osselets, soit au niveau de la caisse ou des parois du tympan, des obstacles s'opposent à la propagation des sons. Si elle réussit à les surmonter l'oreille peut enregistrer et permettre au cerveau de comprendre.

a) **Signes audiométriques** (*).

L'audiogramme obtenu par voie aérienne montre que les diverses fréquences comprises entre 250 Hz et 4.000 Hz sont touchées à peu près dans les mêmes proportions. Cette perte n'excède généralement pas 60 db.

L'audiogramme par voie osseuse qui interroge directement l'oreille interne est normal à 20 db, donc la lésion n'intéresse pas celle-ci.

On note un RINNE négatif, un WEBER latéralisé du côté malade pour toutes les fréquences. Le GELLE est normal ou perturbé dans certaines otites et dans l'otospongiose par suite de processus de nécrose ou d'ossification au niveau des osselets et de leurs articulations.

— Audiométrie supra-liminaire.

Aucune distorsion : pas de recrutement.

— Audiométrie vocale.

La courbe est simplement déplacée à droite sur l'axe des intensités. Elle est parallèle à la normale.

b) **Etiologie.**

Peuvent donner une surdité de transmission :

Les obstacles situés sur le trajet du conduit auditif externe :

Bouchon de cérumen.

Corps étrangers.

Les lésions siégeant au niveau de l'oreille moyenne :

Obstruction tubaire } au début.
Otite }

Otospongiose.

(*) Les différents tests audiométriques, RINNE, WEBER, GELLE, etc..., sont définis dans l'ouvrage déjà cité de DEHAUSSY (9).

B. — SURDITÉ DE PERCEPTION.

La faculté d'interprétation des sons est perdue partiellement ou en totalité par suite de causes très diverses.

a) **Signes audiométriques.**

L'audiogramme obtenu par voie aérienne montre généralement une courbe normale dans les sons graves mais fortement inclinée dans les sons aigus. Parfois elle peut être normale pour toutes les fréquences sauf une, en général celle des 4.000 Hz. De toute façon la perte sur une ou plusieurs fréquences dépasse 60 db.

L'audiogramme par voie osseuse montre une oreille interne atteinte dans les mêmes proportions que la conduction aérienne. Les deux courbes sont parallèles.

b) **Etiologie.**

Peuvent être à l'origine de la surdité de perception .

de nombreuses infections : typhoïde, oreillons, syphilis, méningites, etc... ;

les agents d'intoxications exogènes : les traitements par la quinine, le salicylate, les arsénobenzènes, la streptomycine à fortes doses, etc... ;

les agents d'intoxication endogène : urémie, hyperglycémie, etc... ;

les traumatismes : fracture du crâne, traumatismes acoustiques professionnels des chaudronniers, marteleurs de métaux, etc... ;

les affections neurologiques (tumeur de l'angle pontocérébelleux, neurinème de l'acoustique, méningo-radiculites, etc...) ;

la presbyacousie : vieillissement de l'oreille.

C. — LES SURDITÉS MIXTES.

Ce sont les cas de surdité les plus fréquents. En effet une surdité de transmission évolue souvent vers cette forme par altérations secondaires au niveau de l'oreille interne.

a) **Signes audiométriques.**

L'audiogramme obtenu par voie aérienne montre que toutes les fréquences sont atteintes avec prédominance sur les aigus. Sur une ou plusieurs fréquences la perte excède 60 db.

L'audiogramme par voie osseuse met en évidence une courbe bonne en général dans les graves. Celle-ci fléchit fortement dans les aigus, ayant tendance à devenir parallèle à celle de la conduction aérienne.

Le RINNE, négatif dans les basses fréquences devient égal et même positif vers les aigus. Il y a alors croisement dans les deux courbes.

Dans les basses fréquences, le WEBER est latéralisé du côté malade. Vers les aigus, il se latéralise soit du côté malade, soit du côté sain, suivant la prédominance de l'atteinte de l'oreille moyenne ou de l'oreille interne.

Le GELLE peut être modifié s'il y a ankylose des osselets.

— Audiométrie supra-liminaire.

Il y a présence ou absence de recrutement suivant qu'il existe ou non une atteinte au niveau de l'organe de Corti. Le recrutement peut exister partiellement sur les fréquences les plus touchées ou être total sur une fréquence.

— Audiométrie vocale,

Toutes les formes de courbe peuvent se rencontrer. Elles seront toujours déplacées vers la droite, indiquant l'atteinte de l'organe de transmission, mais aussi elles auront les formes les plus diverses, n'étant plus parallèles à la courbe normale, ce qui indique toujours une participation de l'oreille interne.

b) **Etiologie.**

Les otites } à un stade avancé.
Otospongiose }

Obstructions tubaires.

Les surdités consécutives à certaines fractures du rocher.

En résumé, toutes les infections à point de départ situé dans la caisse, peuvent retentir secondairement sur l'oreille interne.

Les notions que nous venons de rappeler montrent la diversité des problèmes qui ne peuvent manquer d'intéresser l'acousticien.

L'anatomie doit aider à comprendre la façon dont l'oreille normale interprète le son.

L'audiométrie permet de rechercher les différentes causes d'une surdité.

Si ces examens sont pratiqués avec des sons purs au seuil de la perception, il s'agit d'audiométrie tonale liminaire.

Si ces tests utilisent des sons purs mais d'intensité bien au-dessus de ce seuil, il s'agit d'audiométrie tonale supraliminaire.

Bien que le choix d'une prothèse ne découle pas directement de la connaissance de ces notions, du moins sont-elles indispensables, d'une part au médecin pour le diagnostic topographique de la surdité, d'autre part à l'acousticien pour lui éviter des erreurs concernant la bonne application d'une éventuelle prothèse.

CHAPITRE III

NOTIONS SUR LES PROTHÈSES AUDITIVES ET LES TRANSISTORS

I. — NOTIONS SUR LES PROTHESES AUDITIVES

Nous avons vu que l'audiogramme facilitait un diagnostic topographique en situant la lésion dans l'oreille.

Inversement, quand on connaît le type de la lésion, on peut parfois expliquer la forme de l'audiogramme d'une oreille malade à partir de simples considérations physiques.

C'est ainsi qu'ABOULKER (1) partant de la formule de l'impédance acoustique (page 30) montre l'influence des divers facteurs :

a) Si la masse m prédomine, ce sont les basses fréquences qui seront favorisées aux dépens des fréquences élevées ;

b) Une augmentation de la rigidité σ favorise les fréquences élevées ;

c) La friction r augmente l'impédance pour tous les sons et rend moins importantes les résonances que pourraient favoriser certains domaines de fréquence.

On peut ainsi comprendre, tout au moins approximativement, l'influence des lésions sur ces facteurs. Dans le cas d'une perforation du tympan, par exemple, des interférences se produisent entre le son incident et celui transmis par la perforation ; il en résulte une diminution de l'amplitude des vibrations du tympan proportionnée à la surface du trou, en même temps d'ailleurs qu'une diminution de rigidité sensible à la perception des sons de fréquence élevée.

Mais le plus souvent les choses sont trop complexes pour qu'une simple application de la physique puisse expliquer la nature de la perte d'audition.

Quand pour diverses raisons le mécanisme de l'audition de certaines personnes présente une sensibilité anormalement faible et que ce fait leur rend la vie en société très pénible, une prothèse auditive s'avère indispensable. Celle-ci consistera dans l'état actuel de nos connaissances à aider l'oreille défaillante dans son rôle d'adaptateur d'impédance. Elle amplifiera les vibrations sonores en les transmettant soit au conduit auditif, soit à la mastoïde sous forme de vibrations solides.

1°) HISTORIQUE DE LA PROTHÈSE AUDITIVE.

L'industrie met actuellement à la disposition du sourd un très grand choix d'appareils de prothèse. Mais qu'il s'agisse de lunettes acoustiques ou d'appareils de prothèse plus modestes, personne ne s'en montre plus surpris. Pourtant de longues et patientes étapes ont été nécessaires pour aboutir à ces remarquables réalisations techniques.

Pour mieux mesurer l'étendue du chemin parcouru dans le domaine de la prothèse auditive un bref historique est utile.

Il semble logique de résumer cette histoire en trois périodes :

Une période mécanique,

une période électrique,

une période électronique.

a) **Période mécanique.**

Depuis les temps les plus reculés jusqu'à la fin du XIXe siècle, nous assistons à des essais de prothèse ne présentant que peu d'intérêt. Concentrer empiriquement l'énergie sonore semble avoir été le seul résultat et aussi la seule possibilité de cette époque. Que ce soit le geste instinctif de la main entourant le pavillon de l'oreille, l'usage du bâton serré entre les dents ou d'un tuyau acoustique pénétrant dans d'oreille, les résultats demeurent minimes et n'améliorent que quelques cas particuliers.

Les chercheurs de cette période semblent avoir négligé ce qui a trait à la formation et à la transmission du son et au mécanisme de l'audition.

Les effets obtenus par l'intermédiaire de ces cornets ou tuyaux acoustiques aux formes les plus extravagantes étaient tous plus ou moins mauvais en tant que prothèses auditives, par suite de la formation d'ondes stationnaires et de résonnances créant une distorsion harmonique importante.

L'apport des chercheurs de cette période ne pouvait être que des plus modestes parce qu'essentiellement empirique.

b) **Période électrique.**

C'est en 1876 qu'Alexander GRAHAM BELL déjà connu dans le monde scientifique comme un des plus éminents professeurs de sourds-muets découvrit le téléphone. On rapporte qu'ayant épousé une sourde-muette, il réalisa cette remarquable découverte en cherchant à la guérir.

Avec la découverte du microphone par HUGUES la prothèse auditive allait pouvoir entrer dans la voie des réalisations.

Il devenait alors possible de transformer les vibrations sonores en variations de courant électrique, de doser ces dernières par un potentiomètre et de restituer sur un vibrateur des variations relativement amplifiées.

Par étapes lentes, on s'acheminait vers une relative « miniaturisation » d'appareils permettant aux sourds de se rattacher au monde extérieur par la voie osseuse.

Toutefois, cette prothèse, d'un port encombrant et lourd, d'une fidélité très relative, était loin de donner la satisfaction que la période électronique allait apporter aux malentendants.

c) **Période électronique.**

A la fin du second conflit mondial, quand il fallut s'intéresser aux 40.000 militaires américains devenus sourds par traumatismes de guerre, l'Armée et la Marine américaines présentèrent leur programme de réadaptation aux organismes qualifiés. Les premières lampes subminiatures avaient fait leur apparition. Il fallait faire un

choix parmi les nombreux appareils des différentes marques américaines. Il eut pour résultat de permettre la définition des qualités particulières qui devaient être retenues pour qu'une prothèse corrige le mieux possible les différentes surdités. C'était en 1946. Cette façon de faire eut pour conséquence de stimuler l'amélioration des appareils de prothèse auditive, la recherche des qualités particulières à retenir ayant été confiée à l'Université de Harvard (HEARING-AIDS, 14).

Vers 1955, les premiers transistors font leur apparition et améliorent encore la qualité des prothèses.

On trouvera des renseignements historiques plus détaillés sur la prothèse d'autrefois dans un article de GOSSEREZ (11).

Les débuts de la prothèse électronique ont été analysés dans la conférence de BOCCA (2) et dans la thèse de Mlle KANTZER (17).

2°) PRINCIPE DE LA PROTHÈSE.

Seul le principe relatif à la prothèse électronique présente un intérêt pratique étant donné l'évolution actuelle des appareils destinés à corriger les différents types de surdité.

Cependant à chacune des deux périodes historiques que nous avons évoquées, un principe conscient ou non a présidé à la correction de cette infirmité, principe que nous allons rappeler.

a) **Les appareils collecteurs de son.**

Tous les dispositifs utilisés au cours de la période mécanique sont destinés à concentrer le son à l'entrée de l'oreille. Ils présentent une analogie avec les dispositifs volumineux scientifiquement étudiés que sont les appareils paraboloïdaux d'écoute de défense contre avions.

Ils constituent des applications du principe des pavillons jouant le rôle d'adaptateur d'impédance étudié page 26.

Les conques sont des dispositifs à conduction aérienne utilisant le même principe que les cornets ou tuyaux acoustiques. Elles ont la particularité d'avoir été conçues pour tenir toutes seules à l'oreille, donc de fonctionner en permanence.

La conduction osseuse avait déjà été utilisée en faisant aboutir par un conducteur solide à la machoire du sourd les vibrations recueillies le plus souvent par une plaque.

On comprend que tous ces appareils ne pouvaient avoir qu'une efficacité limitée car dès qu'une amplification considérable était nécessaire, leur encombrement les auraient rendus impossibles à transporter.

b) **Prothèse électrique.**

La prothèse électrique est basée sur le principe qui permit à G. BELL de mettre au point le téléphone :

Une plaque métallique devant un aimant placé dans une bobine est mise en vibration par la parole et donne naissance à des courants induits. En passant par un dispositif anologue, ces courants font vibrer une autre plaque de façon identique à la première, ce qui reproduit le son initial.

Dans ce genre de prothèse que nous rappelons, les vibrations acoustiques sont reçues sur la membrane d'un microphone à charbon. Les pressions reçues mettent en mouvement cette membrane. Des granules de charbon électrisés sous une tension de 4,5 volts reçoivent ces impulsions et les transmettent proportionnelles et amplifiées à une autre membrane. On a ainsi restitué le signal d'entrée en l'amplifiant. Par action sur un rhéostat de puissance, le gain peut être réglé à la convenance.

c) **La prothèse électronique.**

Elle est basée sur l'amplification par lampes ou par transistors des courants alternatifs.

L'amplification par lampes est actuellement en voie de disparition. Dans un proche avenir seule l'amplification par transistors sera utilisée. Dans l'histoire de la prothèse auditive ces deux procédés d'amplification marquent, l'un comme l'autre, une date importante.

Un microphone traduit les vibrations sonores en un courant alternatif de même fréquence, courant qui se trouve amplifié par

l'appareil. Un écouteur ou un vibrateur transmet ensuite au sourd l'image amplifiée du son initial.

Nous ne parlerons pas ici de l'amplification par transistors qui fait l'objet d'une étude à la deuxième partie de ce chapitre mais nous rappellerons simplement le principe général des amplificateurs à lampes.

On sait que dans une triode la tension appliquée entre la grille et le filament conditionne le courant plaque et que dans une zone de fonctionnement convenable, l'intensité du courant plaque peut être considérée comme une fonction linéaire de la tension grille.

Une lampe triode dans le circuit plaque de laquelle serait inséré un écouteur magnétique et dont le potentiel de grille serait commandé par le microphone, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un transformateur, permettrait ainsi d'entendre un son plus intense que si le même écouteur était directement inséré dans le circuit du microphone.

En réalité, pour obtenir une amplification suffisante, on utilise simultanément 3 ou 4 triodes qui se commandent en série. La liaison entre elles se fait généralement par résistance ou par transformateur. Dans le premier cas, une résistance assez élevée est insérée dans le circuit plaque d'un tube et la différence de potentiel alternative recueillie aux bornes de cette résistance est appliquée par l'intermédiaire d'un condensateur à la grille du tube suivant. Dans le second cas le courant plaque passe dans le primaire d'un transformateur et on recueille aux extrémités de son secondaire une tension qui est appliquée à la grille du tube suivant.

Mais on peut obtenir des amplifications plus grande en substituant des pentodes aux triodes, pour des alimentations équivalentes.

Ces amplificateurs peuvent avoir une courbe de réponse uniforme en fonction de la fréquence, mais par leurs irrégularités ainsi que par le choix des circuits électriques associés, il est également possible de favoriser certaines fréquences. En outre le choix du microphone et surtout celui de l'écouteur apportent des éléments nouveaux susceptibles d'influencer la courbe de réponse.

De plus, on peut aussi prévoir un dispositif de « compression »

du son, dont le rôle est de limiter l'amplification des sons intenses. En effet, l'oreille appareillée pourrait recevoir des sons, qui, après amplification, se situeraient au-dessus de la courbe de douleur d'où non seulement une gêne, mais par la répétition de ces faits, une fatigue importante de l'oreille accentuant la surdité déjà existante.

On voit ainsi toute la souplesse de ces montages électroniques qui permettent à la fois le réglage de l'amplification générale jusqu'à des valeurs élevées, la modification à volonté de la courbe de réponse, l'élimination des sons trop intenses, ceci avec un encombrement très réduit qui permet au sourd d'emmener partout son appareil. L'inconvénient est évidemment la question de l'alimentation par piles pour les deux circuits : chauffage et tension-plaque. La première se fait généralement sous 1,5 volt et la seconde actuellement sous 22,5 v. C'est d'ailleurs grâce à la « miniaturisation » des pièces en électronique que ces appareils correcteurs de la surdité ont pu être mis au point. De plus l'emploi de lampes minuscules limite le débit des piles. Mais, et c'est là le gros défaut des appareils à lampes, la consommation en piles reste encore très importante et le sourd doit pour cette raison limiter ses heures d'écoute.

Malgré ces possibilités nouvelles, la question s'est posée d'adapter rationnellement l'appareil à chaque surdité particulière caractérisée par son audiogramme et par divers tests qui sortent du cadre de notre travail.

Contrairement à ce qu'on pourrait supposer, la correction qui consisterait à obtenir que l'ensemble, oreille malade plus dispositif correcteur, devienne équivalent à une oreille normale, par exemple du point de vue des courbes seuil et douleur, ne donne pas en général de bons résultats, ce qui prouve que la question de la surdité est encore bien complexe. Aussi de nombreuses mesures statiques ont été pratiquées pour essayer de trouver, grâce à elles, des lois empiriques destinées à orienter la correction prothétique de la surdité.

On ne doit pas oublier que la prothèse auditive n'est qu'un palliatif. Il faut donc utiliser au mieux les possibilités techniques du moment et le problème fondamental est celui de permettre au sourd de correspondre avec les autres, c'est-à-dire qu'il consistera

à lui restituer avant tout l'audition de la voix humaine. Si on le peut, dans des cas bien plus particuliers, on cherchera à lui restituer une audition correcte de la musique.

Or la voix humaine utilise un certain domaine de fréquences sonores, qui ne sont d'ailleurs pas toutes indispensables à la compréhension des mots. Le spectre moyen de la voix humaine a été déterminé en intercalant des filtres entre le microphone et le sonomètre (appareil permettant d'analyser les sons) ; on trouvera les courbes correspondantes dans l'ouvrage de CHAVASSE et LEHMANN (5). Cette étude analytique de la parole a été complétée en appréciant l'influence du filtrage sur l'intelligibilité de la parole et en déterminant le spectre des différentes voyelles et diphtongues.

A partir de l'ensemble de ces données, il a été possible de préciser les conditions du problème de la normalisation des appareils de prothèse auditive et des méthodes de mesure : CHAVASSE et LEHMANN (5) ont ainsi examiné la question des écouteurs à conduction osseuse ou à conduction aérienne, d'après les mesures exécutées au Centre National d'Etude des Télécommunications, organisme officiel chargé de définir les normes pour la France. Ils en ont ainsi déduit la courbe de réponse pour l'appareil de prothèse auditive type, ainsi que les tolérances admises. On trouvera d'ailleurs dans cette publication la bibliographie correspondant aux études qui ont été faites dans divers pays à ce sujet.

Par la suite, des expériences faites sur des sourds par CHAVASSE, PORTMANN, LEHMANN et Mme PORTMANN (7) à l'aide d'appareils répondant ou ne répondant pas aux normes imposées ont permis d'en vérifier la valeur tout en mettant en évidence que dans certains cas particuliers d'autres courbes de réponse pourraient être utilisables.

De sorte qu'un arrêté publié au Journal Officiel (16) a défini les conditions auxquelles doivent satisfaire les appareils de surdité en France. Après avoir défini les termes employés et les méthodes de mesure utilisées, il précise les caractéristiques des différentes parties des appareils et en particulier ce qui a trait à leurs courbes de réponse.

La courbe de réponse est une courbe croissant régulièrement

de 6 db par octave de 500 à 1.000 Hz et donnant une amplitude valable jusqu'à 4.000 Hz qui est seule à considérer.

Cette courbe s'inscrit dans un parallélogramme dit de référence dont les coordonnées sont déterminées d'une part par les fréquences considérées, d'autre part par les gains relevés dans ces différentes fréquences.

Le gain minimum de l'appareil (potentiomètre au maximum et avec un signal d'entrée de 70 db) doit être au moins de 45 db à 1.000 Hz.

En réalité, si les fabricants peuvent construire des appareils présentant d'autres courbes obtenues par certaines modifications extérieures qui ne seraient pas à l'intérieur de cette aire, tout au moins partiellement, l'une d'elles au moins doit y être entièrement contenue.

Ces possibilités sont obtenues par des modifications de circuits électroniques ou par l'emploi d'écouteurs de types différents. A l'heure actuelle on ne peut pas encore d'une façon générale déterminer avec certitude la courbe de réponse de l'appareil qui conviendra le mieux à tel type de surdité caractérisé par son audiogramme et par divers tests.

Cependant on voit quelle richesse de possibilités a apportée l'électronique au prix, il est vrai, d'une alimentation électrique extérieure. Celle-ci est demeurée longtemps une lourde sujétion à cause du mauvais rendement des lampes, mais l'emploi des transistors et peut-être par la suite d'autres dispositifs analogues, l'a réduite dans de très fortes proportions.

Il ne faudrait pas conclure en pensant que l'avenir n'apportera plus que des perfectionnements de détail. En effet, la prothèse telle qu'elle est réalisée actuellement, reste toujours extérieure et vise simplement, comme nous l'avons vu, à compléter l'action de l'oreille lorsqu'elle est devenue défaillante dans son rôle d'adaptateur d'impédances acoustiques.

Une théorie récente de GUEBERINA (13) laisse prévoir de nouvelles possibilités d'appareillage très séduisantes. Il signale dans certaines surdités de naissance, ou des surdités très importantes, des

transferts de fréquence. Certains sourds ne présentant que des reliquats dans les 500 et 1.000 Hz qui s'avèraient inappareillables d'après les théories classiques puisque ne possédant pas de reliquat dans les zones conversationnelles, seraient parfaitement corrigeables. Il suffirait, dans ces cas, de filtrer les amplifications fournies et de donner un gain relativement faible sur les seules fréquences restantes.

Par extension GUEBERINA affirme que les meilleures corrections ne sont pas toujours obtenues chez le sourd en amplifiant les fréquences résiduelles, mais par contre en apportant des harmoniques ou des fréquences complémentaires.

A cette théorie de GUEBERINA s'ajoutent les récentes expériences de DJOURNO (10) permettant d'espérer la restitution d'un certain degré d'audition dans des cas où actuellement nous nous trouvons impuissants.

Cette théorie nécessiterait dans son application une nouvelle éducation de l'oreille.

II. — TRANSISTORS.

L'emploi de transistors constitue incontestablement la solution de l'avenir, tout au moins immédiat.

Sur les lampes, ils présentent en effet l'avantage d'une « durée de vie » beaucoup plus longue. En outre on peut espérer que les sourds, n'étant plus aussi limités dans leurs heures d'écoute par l'onérosité des piles, utiliseront leurs appareils de façon absolument continue. Ainsi deviendrait-il nécessaire de pouvoir vérifier la qualité des transistors en cas de mauvais fonctionnement de leurs appareils.

L'allègement des prothèses auditives, l'éducation du public et la généralisation des soins médicaux permettent d'envisager la généralisation de l'emploi des appareils à transistors. C'est pourquoi le pharmacien qui pratique la vente des appareils d'acoustique médicale devra pouvoir effectuer les dépannages courants. Laissant ici de côté les causes de panne usuelles, normalement étudiées dans les

programmes des certificats de Faculté, nous nous attacherons à l'étude des transistors.

Etant donné la nouveauté de cette question d'une part, la relative complexité des propriétés des semi-conducteurs et du fonctionnement des transistors d'autre part, il convient tout d'abord de résumer les données scientifiques acquises dans ce domaine. Il sera montré ensuite comment une mesure simple peut généralement suffire dans la pratique pour caractériser le bon état d'un transistor.

Nous allons donc rappeler :

1°) la nature les semi-conducteurs et leurs propriétés électriques qui permettent de les utiliser pour la réalisation des diodes,

2°) celle des transistors, organes doués de propriétés amplificatrices.

Du schéma électrique équivalent de ces derniers seront dégagés les principes de fonctionnement à partir des caractéristiques. Celles-ci feront alors apparaître qu'une mesure, généralement unique, peut suffire pour faire connaître à l'utilisateur l'état de fonctionnement d'un transistor.

1°) LES SEMI-CONDUCTEURS.

Seul sera étudié ici le cas des substances cristallisées. En réalité, les morceaux sur lesquels on opère seront le plus souvent constitués par plusieurs cristaux.

A l'intérieur d'un cristal les atomes sont régulièrement disposés suivant un réseau à trois dimensions, les distances inter-atomiques étant de l'ordre de l'angström (10^{-8} cm.).

Pour faire comprendre le fonctionnement électrique des semi-conducteurs il est donc indispensable de rappeler la structure de l'atome isolé pour déterminer ensuite le rôle des actions entre atomes dans le cristal.

A) **Notion sur la structure de l'atome isolé.**

Chaque atome doit être considéré, suivant la théorie de BOHR, complétée par la suite, comme l'analogue d'un petit système solaire

constitué en son centre par le noyau formé de protons et de neutrons et autour duquel gravitent les électrons. Les forces qui lient entre eux noyau et électrons sont des forces d'attraction électrostatique et ont s'attend donc à trouver des trajectoires elliptiques pour les électrons.

En réalité cette conception trop simple a dû être complétée par la suite et il a été montré expérimentalement à partir des spectres que, parmi l'infinité de trajectoires que l'on pourrait prévoir, seules certaines sont effectivement possibles car les énergies des électrons forment une **suite discontinue :** W_1, W_2, ...W_n ...

Un électron peut d'ailleurs passer d'une trajectoire à une autre avec émission d'un rayonnement dont la fréquence ν est liée aux énergies finales et initiales par la relation :

$$h \nu = W_i - W_j \qquad (1)$$

où h est la « **constante de PLANCK** » :

$$h = 6{,}62 \ . \ 10^{-34} \ J \, . \, s \qquad (2)$$

A cet aspect discontinu des phénomènes est venu s'ajouter une autre conception : celle de l'onde associée aux particules en mouvement, ceci à la suite de la découverte de la « diffraction des électrons » par un cristal de nickel, par DAVISSON et GERMER. Il a ainsi fallu substituer à la mécanique classique une nouvelle mécanique dite « **ondulatoire** » valable pour les petites particules. Cette dernière mécanique ne permet plus de déterminer individuellement le mouvement de chaque particule, mais elle donne seulement des résultats statistiques quand on opère sur un grand nombre de particules.

Elle est caractérisée par le fait qu'on introduit une « **fonction d'onde** » ψ des coordonnées spatiales x, y et z et du temps t. Cette fonction est une foncion complexe et la valeur $|\psi|^2$ dz, dy, dz représente la probabilité de présence de la particule à l'instant t dans l'élément de volume dx, dy, dz autour du point de coodonnées x, y, z.

L'équation de SCHRODINGER a permis à L. de BROGLIE d'établir la relation qui lie la longueur d'onde λ de l'onde associée aux caractéristiques de la particule :

$$\lambda = \frac{h}{m \ v} \qquad (3)$$

où m est la masse, v la vitesse dans un milieu équipotentiel. Elle s'applique donc à l'électron.

La mécanique ondulatoire est donc en principe indispensable lorsqu'il s'agit d'électrons. Toutefois, lorsque les champs électriques ou magnétiques varient lentement en fonction des coordonnées, on peut se contenter, même pour ces petites particules, de la mécanique classique. C'est ce qui fait la relative simplicité des calculs se rapportant aux tubes à vide ordinaire. Par contre, lorsque les électrons doivent se déplacer à l'intérieur de cristaux où les champs électriques ont des gradients élevés, tous les problèmes ne peuvent être abordés que par la mécanique ondulatoire. On saisit là l'origine de la complexité du fonctionnement des transistors par rapport à celui des tubes électroniques.

B) **Cas du cristal indéfini.**

Il règne à l'intérieur de la substance des potentiels électrostatiques qui ont la triple périodicité du réseau cristallin. Le problème du mouvement des électrons dans ce milieu n'est donc autre que celui de la propagation de l'onde associée, caractérisée par sa fréquence ν.

Pour montrer la nature de la solution de ce problème, nous rappellerons simplement ici les résultats obtenus en supposant qu'il n'y a qu'une seule dimension x.

On montre que l'équation de SCHRODINGER est, dans ce cas, du type :

$$\psi = F(x)\, e^{2\pi j\,(\pm kx - \nu t)} \qquad (4)$$

où F (x) est une fonction de même périodicité a que celle du réseau cristallin et k une constante, définie à un multiple près, de 1/a, comme on peut le voir sur la formule.

La constante k est le « **nombre d'ondes** » : elle peut être reliée à la longueur d'onde λ par la relation :

$$k = \frac{1}{\lambda} \qquad (5)$$

On se trouve ainsi ramené au problème de la propagation d'une onde électromagnétique dans une « ligne artificielle », constituée

par une chaîne linéaire indéfinie de quadripoles identiques. La propagation ne peut alors se faire que si la fréquence rentre à l'intérieur de certaines bandes, dites « bandes passantes ».

Ici l'énergie de la particule est proportionnelle à la fréquence ν de l'onde, de sorte qu'il revient au même de considérer des « bandes d'énergie ». On a donc représenté (figure 8) le diagramme de l'énergie en fonction de k considéré comme variable.

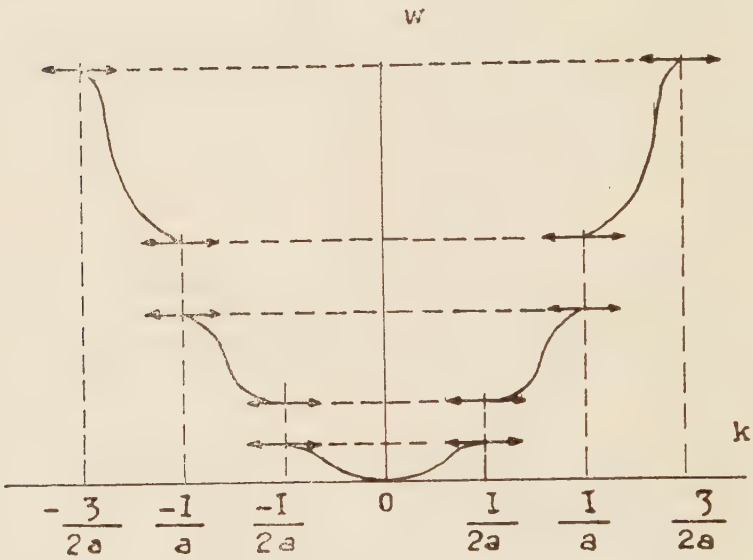


Figure 8

Energie des électrons en fonction de nombre d'ondes.

Ce diagramme est constitué par une série de courbes correspondant dans cette représentation aux trois premières bandes d'énergie. Comme on le voit, la limite supérieure d'une bande comme la limite inférieure de la suivante, correspondent toutes deux à la même valeur de k. Ces valeurs qui marquent les discontinuités, satisfont à la relation :

$$k = \frac{n}{2a} \qquad (6)$$

où a est précisément la distance entre deux atomes consécutifs, n étant un nombre entier positif ou négatif.

Ainsi chaque bande d'énergie correspond sur l'axe des k à l'ensemble de deux intervalles ayant chacun une largeur de 1/2 a Cet ensemble est appelé « zone de BRILLOUIN ».

C) **Cas du cristal réel.**

Si maintenant nous nous plaçons dans le cas de la réalité où les cristaux ont des dimensions finies, il faut que la fonction ψ (équation 4) prenne certaines valeurs spéciales au voisinage des surfaces limitant la matière cristallisée. Pour les obtenir il suffit de considérer deux fonctions de même type qui se superposent et qui, ainsi, donnent un système d'ondes stationnaires.

Si la chaîne linéaire contient N atomes, elle a donc une longueur de (N - 1) a, qui doit être un multiple entier de $\frac{\lambda}{2}$ N étant très grand on peut se contenter d'écrire :

$$Na = p \frac{\lambda}{2} \qquad (7)$$

ou en remplaçant en fonction de k :

$$k = \frac{p}{2\,N\,a} \qquad (8)$$

Ainsi sur l'axe des k, les points correspondants consécutifs sont distants entre eux de $\frac{1}{2\,N\,a}$, c'est-à-dire que chaque zone de Brillouin contient N points. Or c'est précisément le nombre N d'atomes de la chaîne et on peut donc conclure qu'il y a dans cette chaîne une fonction d'onde par atome.

Ce résultat essentiel peut se généraliser au cas du réseau à trois dimensions.

D'autre part, un réseau de N atomes contient généralement plus de N électrons. Si donc on s'attache à déterminer l'état de ces électrons, en supposant tout d'abord que la température soit très basse pour ne pas avoir à considérer l'agitation thermique, ce sont les états de plus faible énergie qui seront occupés. Chaque fonction d'onde tend à être occupée par deux électrons.

En réalité ces deux électrons ne peuvent pas être exactement dans le même état, ceci suivant le principe d'exclusion de PAULI :

les moments cinétiques de ces électrons ou « spins » seront forcément opposés.

Chaque zone de Brillouin correspondra ainsi à 2 N électrons au plus (2 par atome). S'il y a donc plus de deux électrons par atome, la première zone de Brillouin sera complète et la bande d'énergie correspondante sera dite « saturée ». Les zones de Brillouin suivantes se chargeront en couples d'électrons suivant l'ordre des énergies croissantes.

De sorte que dans l'échelle des énergies croissantes, on trouvera de bas en haut des bandes saturées, éventuellement une bande incomplète puis des bandes complètement vides.

D) **Cristal soumis à un champ électrique : Conducteurs, isolants et semi-conducteurs**

1) ISOLANTS.

A l'action du potentiel périodique due à la structure cristalline, s'ajoute alors maintenant celle des forces extérieures dues à l'introduction d'un champ électrique.

Nous admettrons que la fonction d'onde ψ conserve la même forme, mais à la condition de ne plus considérer k comme une constante, mais comme une variable définie en fonction de la force extérieure F par la relation :

$$F = h \frac{dk}{dt} \qquad (9)$$

Nous ne développerons pas ici le calcul qui conduit à retrouver la formule classique de la dynamique :

$$F = m' \frac{dv}{dt} \qquad (10)$$

mais où m' est une « masse apparente » pouvant être positive ou négative : positive dans la partie inférieure d'une bande d'énergie et négative dans la partie supérieure.

Si la force est appliquée aux électrons d'une bande saturée, on montre que la somme algébrique des vitesses des électrons reste nulle, malgré que les vitesses individuelles aient été augmentées.

Il en résulte donc qu'une bande saturée n'apporte pas de conductibilité et que si la bande supérieure d'un corps est saturée, ce corps sera **isolant.**

2) CONDUCTEURS.

Cette compensation interne ne peut plus jouer si la bande est incomplète.

En effet : 1°) Ou la bande contient peu d'électrons : ceux-ci se placent par conséquent aux niveaux inférieurs et ils auront une masse positive par application de la force ; ils se déplaceront donc dans le sens de la force et c'est le cas du **conducteur** à « **conduction par électrons** ».

2°) Ou, au contraire, la bande est presque saturée : les électrons prennent une masse négative et il est alors plus commode de raisonner sur la « **conduction par trous d'électrons** ».

La distinction entre les deux modes de conduction peut d'ailleurs se faire expérimentalement en déterminant le sens de l'effet HALL (action d'un champ magnétique sur les lignes de courant à l'intérieur de la substance).

Rôle de la température. — Ce facteur se traduit par l'apparition de mouvements oscillants des atomes du réseau cristallin, mouvements dont l'énergie se communique aux électrons qui peuvent de ce fait atteindre des niveaux plus élevés.

La nature même du phénomène n'est guère changée dans le cas des métaux qui voient leur conductibilité diminuer avec la température.

Pour les isolants, où la dernière bande occupée est saturée, il y aurait bien une certaine augmentation de la conductibilité avec la température due au fait que la bande saturée tend à perdre quelques électrons au profit de la bande suivante supérieure, primitivement vide. Mais cet effet reste pratiquement très petit aux températures habituelles parce que l'intervalle qui sépare les deux bandes est généralement trop grand (de l'ordre de plusieurs électrons-volts).

Au contraire, il existe des substances dites « **semi-conductri-**

ces » telles que cet intervalle soit assez faible (de l'ordre de 1 électron-volt) de sorte que, dès la température ordinaire, le transfert d'électrons d'une bande à l'autre est suffisant pour que la substance présente une conductibilité notable.

3) LES SEMI-CONDUCTEURS.

Dans cette catégorie, on trouve tout d'abord des substances pures telles que oxyde de cuivre, silicium, germanium. Elles appartiennent à la catégorie générale des isolants mais leur particularité réside dans le faible écart d'énergie entre les deux bandes considérées : 0,76 éelctron-volt pour le germanium par exemple. Ce sont les « **semi-conducteurs intrinsèques** ».

Mais on a observé que d'autres semi-conducteurs, plus intéressants encore, peuvent être obtenus à partir de substances contenant de petites quantités d'impuretés très efficaces.

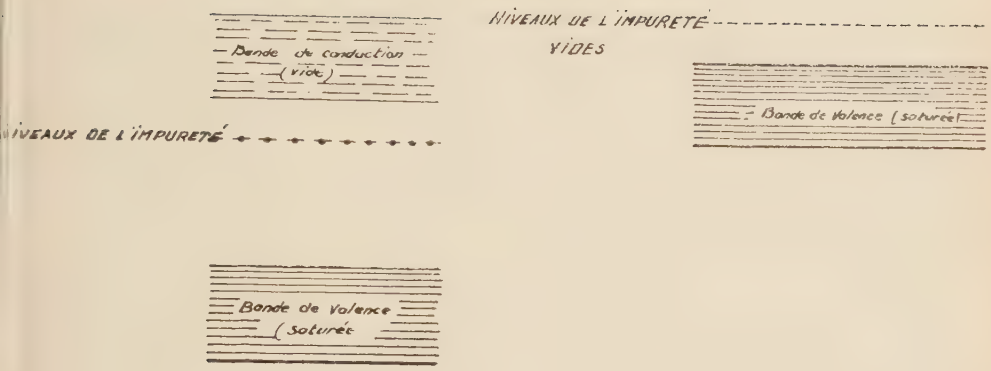
Si nous considérons le cas très étudié du germanium (de valence 4) l'addition à l'état de traces d'éléments de valence 5 comme le phosphore, l'arsenic, l'antimoine ou le bismuth, ou alors d'éléments de valence 3, comme le bore, l'aluminium, le gallium ou l'indium, modifie considérablement la conductibilité. Pour fixer l'ordre de grandeur, on peut dire que la résistivité est divisée par 100 par addition d'un atome d'une impureté convenable par million d'atomes de germanium.

On les appelle « **semi-conducteurs extrinsèques** ». Ce sont surtout eux qui interviennent dans les montages électroniques et nous allons expliquer sommairement le mécanisme de l'action des impuretés.

Les atomes étrangers se trouvent, après cristallisation, être pris dans le réseau régulier du germanium. Mais, là où ils se trouvent, il y aura, soit un électron en excès (éléments pentavalents), soit un manque d'électron (éléments trivalents).

On parlera dans le premier cas de **semi-conducteurs du type N** et dans le second de **semi-conducteurs du type P.**

Pour comprendre le fonctionnement, il faut se reporter au diagramme des énergies (figure 9) :



A — Semi-conducteurs type N B — Semi-conducteurs type P

Figure 9

Les niveaux d'énergie dans le cas des semi-conducteurs.

Dans le cas du type N (figure 9 A), les électrons en excès se trouvent sur des niveaux supplémentaires qu'ils saturent. Mais l'écart de ces niveaux avec la première bande vide immédiatement supérieure, est extrêmement faible, de l'ordre de 0,01 électron-volt. Aussi peuvent-ils passer facilement dans cette bande en donnant au cristal une conductibilité par électrons.

Pour le type P (figure 9 B), l'écart entre les niveaux supplémentaires et la bande de valence sous-jacente est du même ordre de grandeur. Mais cette fois ce sont les niveaux supplémentaires qui sont vides à très basse température et qui tendent à se saturer à la température ambiante au détriment de la bande de valence Celle-ci donne alors une conductibilité par trous.

2°) ACTIONS DE CONTACT : DIODES ET TRANSISTORS.

On a vu précédemment que les électrons ou les « trous » pouvaient se déplacer à l'intérieur d'un conducteur ou d'un semi-conducteur. Cependant, pour faire sortir ces charges du milieu, il est indispensable de dépenser une certaine énergie pour vaincre les forces électrostatiques résultant de l'ensemble des charges. C'est surtout au voisinage immédiat de la surface du conducteur que se manifestent ces forces à une profondeur qui est de l'ordre de la distance qui sépare deux atomes voisins, c'est-à-dire de l'ordre de l'angstrôm.

Il en résulte qu'il existe un certain travail de sortie Ws pour chaque électron et que, si la température s'élève, il y aura un nombre de plus en plus élevé de ces électrons qui seront capables d'acquérir ce supplément d'énergie nécessaire à leur libération. En divisant cette énergie Ws par la charge de l'électron (l'énergie étant exprimée en électron-volt), on peut ainsi définir un potentiel de sortie Vs en volt :

$$V_s = \frac{W_s}{e} \qquad (11)$$

C'est là le principe de l'émission des électrons par un filament chauffé dans les tubes à vide. Mais cette libération d'électrons peut aussi être obtenue par l'action d'un rayonnement de fréquence suffisamment élevée et c'est là le principe des cellules photo-électriques.

Si maintenant on place deux conducteurs métalliques de nature différente l'un près de l'autre on montre que des électrons pourront passer de l'un à l'autre. S'ils sont en contact immédiat le phénomène est d'ailleurs facilité. Dans tous les cas c'est le métal dont l'énergie d'extraction est la plus faible qui cèdera plus d'électrons que l'autre métal ne peut lui en rendre. Il deviendra donc positif par rapport à l'autre : il naîtra ainsi une différence de potentiel de contact.

On peut même montrer que cette différence de potentiel V est reliée à V_{s1} et V_{s2}, potlntiels de sortie des métaux 1 et 2 par la relation très simple :

$$V = V_{s1} - V_{s2} \qquad (12)$$

Si maintenant on crée artificiellement une différence de potentiel entre les deux métaux en les reliant à une source d'électricité, on peut alors généraliser le raisonnement précédent qui a conduit à la formule (12) et montrer que le courant passe plus aisément dans le sens où les électrons quittent le métal qui a le plus faible travail de sortie. C'est l'apparition d'un effet de « **redressement** ».

a) **Redresseurs et diodes à semi-conducteurs.**

L'effet de redressement reste toujours peu marqué lorsqu'on

utilise des couples de métaux. Au contraire, il devient notable et souvent utilisable si des semi-conducteurs interviennent.

On peut reprendre le même raisonnement en substituant à un couple de métaux un semi-conducteur et un métal et on arrive aux mêmes conclusions. Par exemple, un semi-conducteur mis en contact avec un métal à travail d'extraction des électrons plus élevé, deviendra positif par rapport au métal, mais comme les centres donateurs d'électrons sont assez rares dans les semi-conducteurs, la couche superficielle ainsi perturbée sera plus profonde dans le semi-conducteur qu'elle ne l'aurait été dans un métal. Il se crée une « barrière de potentiel ».

On observe également un effet de redressement si l'on met en contact un semi-conducteur du type N avec un semi-conducteur du type P.

Ces phénomènes ont été utilisés depuis longtemps à constituer des « redresseurs secs » à Cu_2O sur Cu, à Se et, au début de la T.S.F. à galène. On a créé tout récemment les « diodes » à germanium et à silicium, qui sont utilisables aux hautes fréquences et qui sont constituées par le contact d'une pointe métallique avec ces semi-conducteurs.

Nous n'examinerons pas ici le détail du fonctionnement de ces redresseurs, qui n'interviennent pas dans les appareils de surdité.

b) **Les Transistors.**

Nous avons vu précédemment qu'un semi-conducteur soumis à l'action d'un champ électrique devenait le siège d'un courant. En réalité il y a lieu de tenir compte, comme nous allons le voir, des deux catégories de porteurs de charges : les électrons et les trous. Les uns et les autres produisent des effets qui s'ajoutent comme au sein d'un électrolyte, les cations et anions. Le résultat est que le semi-conducteur obéit à la loi d'OHM :

$$\vec{i} = \gamma \vec{E} \qquad (13)$$

où γ est la conductibilité.

Mais la différence essentielle entre métal et semi-conducteur réside dans le fait que, si dans un métal la conductibilité est fixe

parce qu'il n'y a qu'un seul type de porteurs de charge et qu'il n'est pas possible d'en augmenter le nombre sans par là même créer des champs électriques antagonistes, par contre, dans un semi-conducteur, il est possible par certaines actions de modifier la conductibilité.

Ceci résulte des propriétés déjà indiquées : tant que les électrons restent dans la bande de valence, le corps est isolant et les propriétés conductrices n'apparaissent qu'autant que certains électrons peuvent quitter cette bande pour passer dans celle de conduction. C'est même cette facilité relative qui caractérise les semi-conducteurs.

On pourra donc augmenter cette conductibilité en favorisant ce transfert d'électrons. Un premier moyen, déjà signalé, est l'action d'un rayonnement. Mais nous allons montrer maintenant qu'un résultat analogue peut être obtenu par le contact d'un semi-conducteur avec un métal.

Pour cela, il faut reprendre plus en détail l'étude de l'effet de « redressement » signalé page 60. Si on considère, par exemple, un semi-conducteur du type N au contact d'une surface de tungstène, il s'établit dans le semi-conducteur une barrière de potentiel et le métal capte des électrons qui lui donnent ainsi une charge négative.

A l'intérieur du semi-conducteur mais au voisinage immédiat de la surface, les niveaux énergétiques des bandes de conduction et de valence se trouvent être localement relevés, au point que la bande de valence la plus basse peut alors céder des électrons au métal, d'où par conséquent l'apparition de trous, mais cette fois en nombre plus élevé que celui des électrons apparus dans la bande de conduction.

Ainsi dans une zone relativement mince de la surface du semi-conducteur et par la proximité même du métal il y a une conductibilité plus élevée. C'est pourquoi on désigne cette zone sous le nom de « zone d'inversion ».

Si maintenant on donne artificiellement une charge positive au métal, les électrons du semi-conducteur vont se diriger vers le métal tandis que les trous s'enfonceront plus profondément dans

le semi-conducteur : on dit qu'il y a « injection de trous ». D'une façon analogue on pourrait injecter des électrons dans un semi-conducteur du type P.

C'est sur ce phénomène que repose le principe des transistors, réalisations dues aux travaux des chercheurs des laboratoires BELL aux Etats-Unis.

Une lame de germanium, type N, très petite est fixée sur un petit bloc de laiton (figure 10). Deux pointes en tungstène ou en bronze phosphoreux viennent en contact avec la face supérieure de la lame de Ge, la surface de contact étant de l'ordre de 1 μ^2 et les deux pointes étant distantes entre elles de 50 à 240 μ. C'est le **transistor à pointes.**

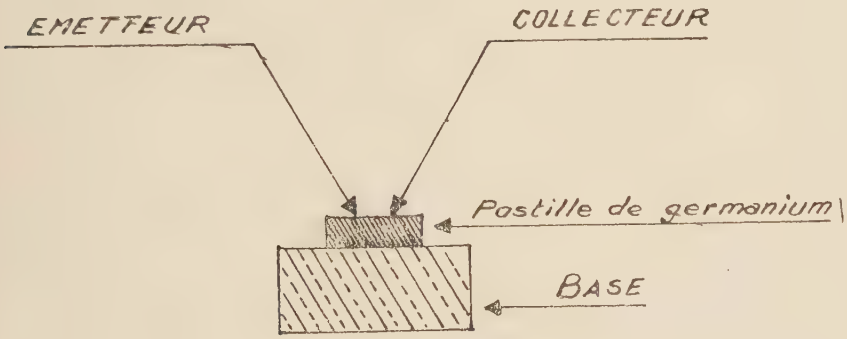


Figure 10

Coupe d'un transistor à pointes (la monture n'est pas présentée)

L'émetteur étant positif par rapport à la base, il produit dans celle-ci l'injection de trous, tandis que le collecteur négatif attire ces trous. Plus l'émetteur est positif, plus les trous injectés sont nombreux et par conséquent plus le courant recueilli par le collecteur est intense.

Il y a donc une véritable modulation du courant du collecteur par la tension de l'émetteur. On est tenté aussitôt de faire, tout au moins qualitativement, un rapprochement avec le dispositif de la lampe triode où la tension grille commande l'intensité du courant plaque.

Nous verrons par la suite que s'il y a fonction amplificatrice dans les deux cas, le mode d'action du transistor est très différent

de celui d'une lampe. Mais une première comparaison fait apparaître certains avantages du transistor. Il n'y a pas d'électrode chaude, d'où par conséquent une économie sérieuse de courant ; les tensions utilisées sont souvent de l'ordre du volt (au lieu de quelques dizaines de volts pour les lampes) ; enfin, l'encombrement du transistor est très réduit, ses dimensions étant de l'ordre de quelques millimètres.

Par contre, il reste sensible à l'action de la température et tel qu'il vient d'être décrit il ne peut pas être traversé par des courants intenses qui risqueraient, par les faibles surfaces de contact notamment, de le mettre hors d'usage.

Mais on a pu pallier dans une certaine mesure à ce dernier inconvénient en augmentant précisément la surface des contacts actifs ceci par la réalisation des « **transistors à jonctions** ». Là les contacts métal-germanium sont remplacés par des contacts germanium N — germanium P. Il existe ainsi la catégorie « P-N-P » où un bloc de germanium est de type N dans sa partie centrale et de type P à ses extrémités. Chaque jonction fonctionne comme une diode métal-germanium mais avec une surface de contact beaucoup plus étendue, de l'ordre cette fois du mm2. On peut ainsi atteindre une puissance de 1 watt et parfois davantage.

De façon analogue on a créé des transistors à jonctions du type « N-P-N ».

c) **Caractéristiques des Transistors.**

On considèrera le transistor comme un système électrique à deux entrées (quadripole) tel qu'il est représenté schématiquement par la figure 11

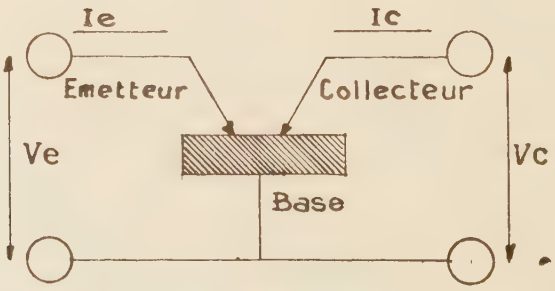


Figure 11
Schéma électrique du transistor

Nous allons maintenant nous attacher à l'étude des transistors à jonction. Il existe 3 modes de branchement qui sont les suivants (figure 12) :

1. — **Emetteur à la masse** (« montage E »), figure 12 A.

2. — **Base à la masse** (« montage B »), figure 12 B.

3. — **Collecteur à la masse** (« montage C »), figure 12 C.

Pour faire ressortir l'analogie avec les montages à triodes, nous avons juxtaposé à ces derniers les branchements de transistors correspondants.

Les deux premiers montages sont les plus employés. C'est le premier qui donne l'amplification en courant la plus importante, le second nécessitant un transformateur par suite de la faible amplification. Quand au troisième, il joue surtout le rôle d'étage d'adaptation entre deux impédances.

On trouvera dans l'ouvrage de GOUDET et MEUNIEAU (12) toutes les précisions mathématiques, ainsi que la bibliographie sur les transistors. Nous n'examinerons ici que les points indispensables à l'utilisateur.

Pour comprendre le fonctionnement d'un transistor dans toutes les conditions d'emploi, il faudrait pouvoir disposer du réseau complet de ses caractéristiques, ici plus complexes que celles des tubes. La plupart des auteurs, ainsi que les notices de constructeurs, s'attachent aux caractéristiques des types « base à la masse ».

On se trouve alors en présence d'un quadripôle (figure 11) caractérisé par V_e et V_c, tensions respectives de l'émetteur et du collecteur auxquelles correspondent les intensités I_e et I_c.

Il n'est pas possible de l'assimiler à une simple cellule en T, qui serait caractérisée par les 3 résistances pures r_e, r_c et r_b (figure 13), ceci précisément à cause des propriétés du semi-conducteur.

Par contre, on peut obtenir un équivalent du transistor en ajoutant à r_c un générateur de force électromotrice $r_m \cdot \Delta I_e$ (figure 14), si l'on écrit de façon générale que :

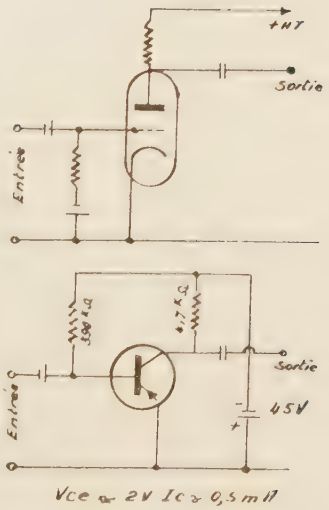


Figure 12 A

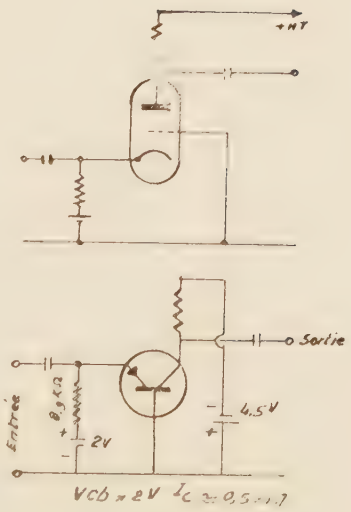


Figure 12 B

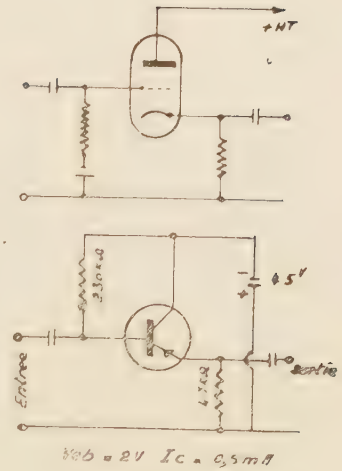


Figure 12 C

D'après la notice des transistors OC 70 et OC 71 (23)

$$\Delta v_e = \frac{\delta v_e}{\delta I_e} \Delta I_e + \frac{\delta v_e}{\delta I_c} \Delta I_c \qquad (14)$$

$$\Delta v_c = \frac{\delta v_c}{\delta I_e} \Delta I_e + \frac{\delta v_c}{\delta I_c} \Delta I_c \qquad (15)$$

r_m est ainsi une résistance fictive de valeur élevée, ce qui caractérise les propriétés amplificatrices.

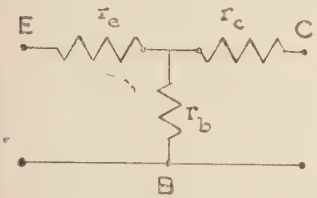


Figure 13

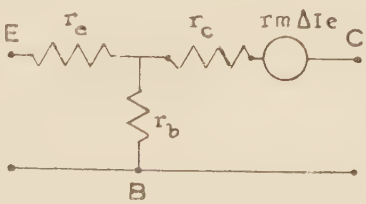


Figure 14

Cette conception s'accorde avec les différentes caractéristiques que l'on peut trouver pour un type de transistor donné, et en particulier, pour ce montage E :

V_c en fonction de I_b pour différentes valeurs de V_c
I_c en fonction de I_b pour différentes valeurs de V_c
V_b en fonction de V_c pour différentes valeurs de I_b
I_c en fonction de V_c pour différentes valeurs de I_c

En fait il est intéressant dans les montages d'amplificateurs de basses fréquences de se fixer un point sur ces diagrammes définissant les paramètres statiques et de considérer ensuite les variations de ces facteurs correspondant à la composante alternative, supposée suffisamment petite pour avoir le droit en ce point d'assimiler les courbes à leurs tangentes. C'est ainsi que les constructeurs indiquent les gains en courant en précisant les conditions d'emploi. On trouvere en particulier les documents correspondant aux divers types de transistors dans les livres de MOTTE (18) (19) et les schémas de montage dans ces deux livres ainsi que dans celui de HURE (14).

C'est ici le montage E qui nous intéresse plus particulièrement et c'est pourquoi nous avons voulu pouvoir réaliser un appareil permettant de déterminer I_c en fonction de V_c pour des valeurs de I_b variables. On dispose ainsi des caractéristiques du transistor.

Au chapitre IV nous montrerons comment il est possible d'obtenir ces caractéristiques à l'aide du transitormètre que nous avons construit.

Mais dans des mesures comparatives, on peut même se contenter d'une simple méthode de mesure des résistances entre base et collecteur, ou alors insérer un générateur et un milliampèremètre entre émetteur et collecteur, la base et l'émetteur étant réunis par une résistance fixe.

CHAPITRE IV

APPAREILS DE MESURE EN PROTHÈSE AUDITIVE

L'acousticien doit pouvoir contrôler le bon fonctionnement d'un appareil de prothèse auditive.

Fils, piles, tubes électroniques et transistors sont des éléments accessibles perturbant souvent la marche de ces appareils. Nous limiterons notre vérification à ces seules pièces détachables.

Le prothésiste a des instruments de contrôle à sa disposition pour apprécier la valeur des fils et le degré d'usure des piles : Voltmètre et Ohmmètre.

Par contre il ne semble pas exister de lampemètres spécialement adaptés aux tubes « subminiatures » des appareils de prothèse. Aussi avons nous pensé qu'il y avait lieu d'en construire un.

Quant aux transistors, bien qu'ils ne soient pas encore amovibles comme les tubes, nous avons estimé qu'il serait utile de réaliser un appareil permettant une mesure rapide de leurs caractéristiques, puisque leur usage se généralise en prothèse auditive.

Nous étudierons enfin l'évolution éventuelle de la courbe de réponse d'un appareil de prothèse après un temps plus ou moins long de fonctionnement.

I. — CONTROLE DES FILS ET DES PILES

a) Ohmmètre.

Deux fils souples composent le cordon qui relie l'écouteur ou le vibrateur à l'appareil de surdité. Chaque extrémité du cordon se termine par une petite broche à deux fiches. Si les deux fils sont en bon état le courant d'une pile soit passer. En reliant tour à tour aux connexions d'un ohmmètre une fiche terminale et l'une de celles

qui lui sont opposées, l'aiguille indique ou non le passage d'un courant.

b) **Voltmètre.**

Il suffit d'un simple voltmètre pour vérifier la qualité des piles. Chaque fois que les bornes seront accessibles, il sera préférable de mesurer la tension des piles lors du fonctionnement de l'appareil. De plus, le voltmètre devra être de bonne qualité, c'est-à-dire avoir une résistance de l'ordre de 10.000 ohms-volt. Sans cette condition, la mesure pourrait être erronée par défaut, étant donné le faible débit demandé aux piles de tension plaque.

Il existe d'ailleurs des appareils qui permettent de mesurer la différence de potentiel aux bornes d'un générateur tout en le faisant débiter. Il suffirait, dans le cas particulier des appareils de surdité, d'associer le voltmètre à une résistance demandant à la pile une consommation analogue ou légèrement supérieure.

C'est notamment le cas des « lunettes acoustiques » où l'accès aux bornes est impossible lorsque la pile est mise en place.

Toutefois, ces mesures ne présentent le plus souvent qu'un intérêt assez limité car l'usager acquiert rapidement la notion de la durée du type de pile qu'il utilise. En particulier, il constate que l'audition s'affaiblit de façon progressive à partir d'un certain laps de temps. Il est pratiquement toujours muni d'une batterie neuve.

II. — LAMPEMETRE REALISE POUR LES TUBES UTILISES EN PROTHESE AUDITIVE

A. — LES TUBES.

Les tubes électroniques utilisés dans les appareils de surdité sont identiques dans leur principe aux tubes employés dans d'autres réalisations électroniques. Seul un encombrement beaucoup plus réduit les différencie des tubes ordinaires. En outre un brochage spécial les rend amovibles.

A la suite d'un choc ou simplement par usure, les filaments peuvent être plus ou moins endommagés.

Il arrive assez fréquemment que le numéro figurant sur un tube se trouve effacé. Il est alors impossible de l'identifier.

Il est particulièrement intéressant de se rendre compte si les caractéristiques sont conformes à celles données par le constructeur.

Notre appareil facilite cette identification quel que soit le tube « subminiature ».

B. — PRINCIPE DE CE LAMPEMÈTRE.

Nous avons donc cherché à réaliser un dispositif qui offrirait des possibilités aussi étendues que possible. Nous demandons en particulier à cet appareil de se prêter aux essais suivants :

1°) Essai des filaments,

2°) Mesure de l'émission cathodique,

3°) Possibilité de tracer les caractéristiques complètes des tubes :

a) Valeur de la pente

b) Résistance interne

c) Coefficient d'amplification,

4°) Contrôle du vide,

5°) Isolement entre chaque électrode.

Les trois premiers essais présentent seuls un intérêt pratique. Les deux autres n'ont qu'un intérêt très restreint et surtout théorique. Le contrôle du vide et celui de l'isolement entre électrodes n'ont pratiquement plus besoin d'être faits à l'heure actuelle étant donné la qualité des lampes que l'on trouve sur le marché, même dans le domaine de ces tubes « subminiatures ».

1°) **Essai des filaments.**

La pile autonome de chauffage des filaments est mise hors circuit par un interrupteur R fixé sur notre lampemètre. Deux bornes d'accès permettent de brancher les extrémités de l'ohmmètre en parallèle avec les filaments. L'appareil utilisé ici est du type « METRIX ». La déviation de l'aiguille sur le cadran de l'ohmmètre indique l'intégrité des filaments.

2°) **Mesure de l'émission cathodique.**

Le principe de cette mesure consiste à réunir entre elles plaque et grille. Le filament est connecté à cet ensemble par l'intermédiaire de la pile de polarisation et d'un milliampèremètre. On aboutit ainsi au schéma classique de la diode. La pile de polarisation est prévue pour être incorporée au lampemètre. Cependant il est possible d'utiliser une polarisation extérieure et d'obtenir ainsi des tensions variables de polarisation. Connaissant l'intensité du courant plaque, il sera facile, si on le désire, de déduire la résistance de la diode ainsi constituée.

Normalement les piles utilisées sont de 22,5 volts. Certains tubes fonctionnant sous des tensions de 15 à 30 volts, une connexion extérieure a été prévue pour permettre leur utilisation.

Toutefois, les trois circuits plaque, grille de commande, grille écran, sont chacun interrompus entre deux points reliés normalement par un court-circuit. Dans le cas de mesures spéciales, il sera ainsi possible de remplacer ce court-circuit par des résistances ou par tout autre appareil. Un inverseur monté sur chacun des trois circuits permet, dans une position, de réunir toutes les grilles à la plaque et, dans l'autre, de rendre autonome chacune d'elles.

3°) **Tracés des caractéristiques.**

Le tube peut être monté en triode ou en penthode.

a) Montage en triode.

La grille écran G_2 est réunie à la plaque, la commande se faisant par la première grille G_1. Sa polarisation est obtenue sur le point mobile d'un potentiomètre P_1 de 50.000 ohms. Celui-ci, par un autre jeu de connexions, peut se trouver réuni soit à la pile de 22,5 volts, soit à une autre de 4,5 volts incorporée ou extérieure et de plus branchée en sens inverse. Ce dernier dispositif permet une polarisation négative.

b) Montage en penthode.

La grille écran est cette fois réunie à un potentiomètre P_2 de 50.000 ohms branché par un jeu de connexion aux bornes de la pile de 22,5 volts. Le reste du montage est identique. Il sera donc

possible de porter la grille-écran à un potentiel compris entre 0 volt et — 22,5 volts. Dans cet essai comme dans le précédent, nous utiliserons encore un milliampèremètre type « METRIX »

4°) **Contrôle du vide.**

Le principe consisterait à comparer le courant plaque avec ou sans résistance grille.

Supposons que le vide ne soit pas parfait. Sous l'influence des électrons, les molécules gazeuses résiduelles deviennent des ions. Les ions négatifs sont captés par la plaque en même temps que les électrons, alors que les ions positifs le sont par la grille. Il en résulte un courant inverse dans le circuit plaque tandis qu'un courant grille notable apparait. Si on interpose une résistance importante dans le circuit grille, il en résulte une différence de potentiel à ses bornes et par conséquent un changement de polarisation de la lampe qui modifiera le courant plaque. Intercalons dans le circuit grille une résistance de un mégohm qui pourra être court-circuitée Si le vide est bon, pour une polarisation de l'ordre de un volt, le courant plaque ne changera pas qu'il y ait une résistance ou pas.

Une mesure plus détaillée serait obtenue en étudiant l'intensité du courant grille en fonction du potentiel de grille. On observerait alors un point d'inflexion sur cette courbe. Le courant grille d'ailleurs ne dépend que de la polarisation et il est indépendant des tensions plaque-écran qui n'interviennent pas dans sa formation.

Dans notre schéma, nous n'avons pas prévu cette possibilité, mais il serait facile de la réaliser de la manière suivante : à la place du court-circuit habituel, un branchement muni d'un inverseur dirigerait le courant grille dans la grille, soit directement, soit par l'intermédiaire d'une résistance de un megohm. L'observation du milliampèremètre renseignerait sur la valeur du vide à l'intérieur de la lampe.

5°) **Isolement entre chaque électrode.**

Cette mesure n'a pas non plus été explicitement prévue sur notre appareil mais elle resterait toutefois facile à réaliser par l'adjonction d'un accessoire aisé à construire.

On utiliserait dans ce cas une source d'au moins 100 volts pour

déceler le court-circuit qui peut lui-même n'avoir qu'une résistance assez élevée. L'essai n'a de sens que si on opère à chaud, c'est-à-dire dans les conditions pratiques d'emploi du tube. Or à ce moment si l'électrode se trouve positive par rapport à la cathode, il y aura toujours un courant même si la lampe est bonne.

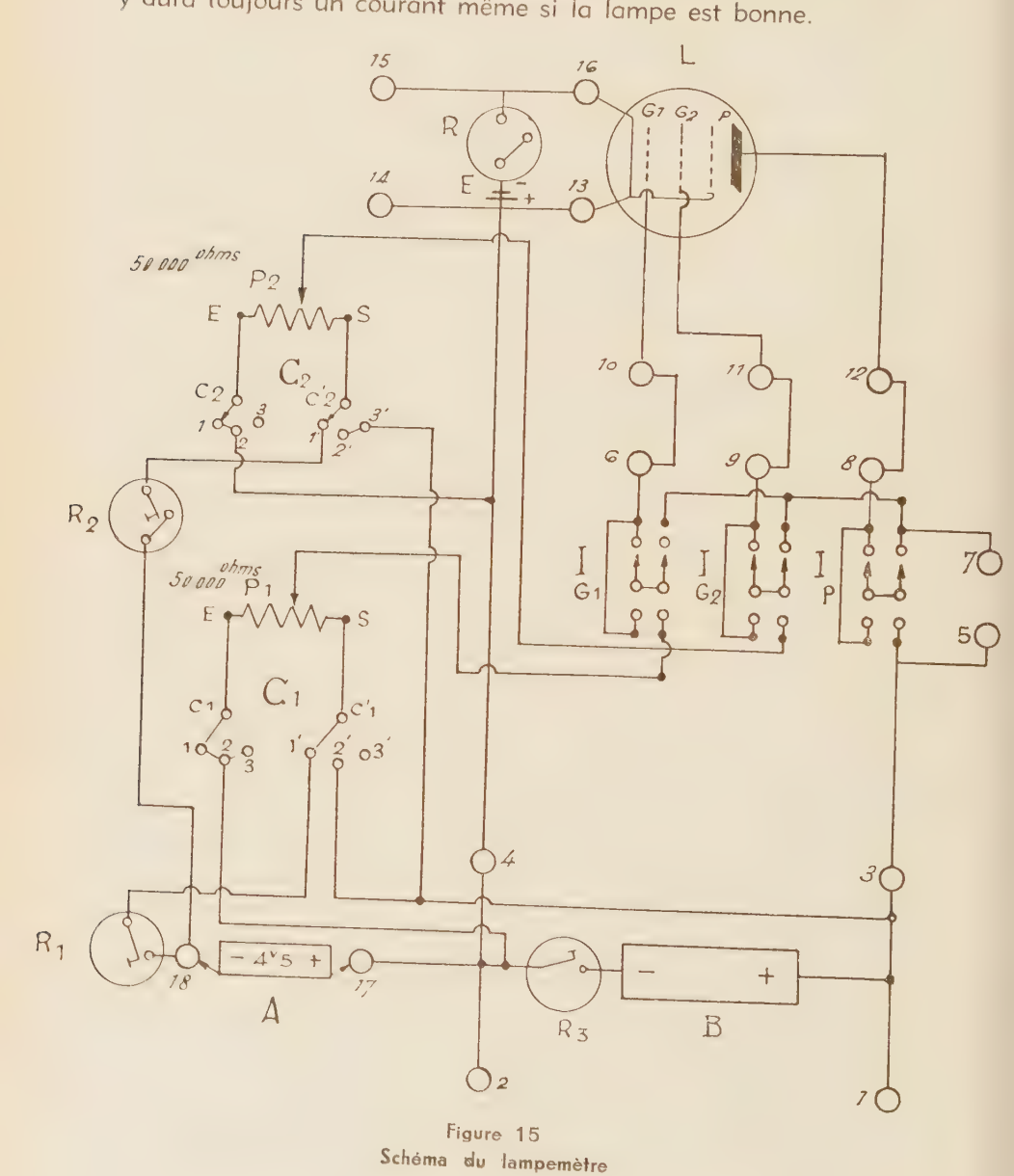


Figure 15
Schéma du lampemètre

Aussi doit-on utiliser l'artifice suivant : prendre un tube au néon comme indicateur. Celui-ci est placé en série avec un condensateur de 0,5 microfarad, shunté lui-même par une résistance de 0,5 mégohm et alimenté par le secondaire d'un transformateur débitant au moins 100 volts. Cette portion de circuit peut aussi être insérée entre la cathode et l'électrode étudiée. Il suffit donc de construire un tel circuit et de le placer aux bornes d'accès des différents éléments de la lampe prévue à dessein sur notre schéma.

C — DESCRIPTION DE NOTRE LAMPEMETRE (figure 15).

1°) **Fixation du tube.**

Le tube est placé sur une prise analogue à celle que l'on rencontre dans les appareils de prothèse. Elle donne accès à chaque électrode par l'intermédiaire d'un fil. Chacun d'eux aboutit à deux bornes normalement court-circuitées, mais entre lesquelles il est éventuellement possible d'insérer telle partie de circuit voulu.

Chaque électrode est reliée à un inverseur qui la rend soit autonome, soit solidaire de la plaque. Ainsi, dans la mesure de l'émission cathodique, les inverseurs des deux grilles placés en haut les relient à la plaque et le courant plaque est mesuré par le milliampèremètre inséré dans le reste du circuit. Placé en bas, l'inverseur rend l'électrode autonome. On lui applique alors une tension positive ou négative prise sur un potentiomètre dont on réunira les deux extrémités par le jeu d'un contacteur deux circuits trois positions.

2°) **Alimentation.**

a) Filaments.

Le chauffage est normalement fourni par une pile incorporée « E » de 1,5 volt qui est mise en circuit par l'interrupteur R. Il est toutefois possible d'utiliser une alimentation extérieure (accus) branchée aux douilles 14 et 15 ou éventuellement 13 et 16. Les douilles 14 et 13 sont ainsi toujours réunies au positif de la pile incorporée.

b) Plaque et grilles.

Deux piles A et B de 4,5 volts et de 22,5 volts ont été prévues

respectivement pour les tensions plaque et grilles. Elles sont normalement incorporées, mais on peut également les remplacer par des piles extérieures à brancher aux douilles 17 et 18 pour A (4,5 volts), entre 1 et 2 pour B (22,5 volts). Un interrupteur R_3 permet de ne mettre en service B qu'au moment de l'emploi, tandis que les interrupteurs R_1 et R_2 commandent le débit de A en vue de l'alimentation des grilles.

3°) **Etude des différents circuits.**

1) Circuit plaque.

2) Circuit de commande de la grille G_1.

3) Circuit de commande de la grille écran G_2.

a) Circuit plaque.

La plaque est reliée au positif de « B » d'une part par l'intermédiaire successivement d'un court-circuit en 8 et 12 qui permet d'introduire éventuellement un appareil et d'autre part un inverseur I_p. Celui-ci en sa position supérieure est destiné à faire passer le courant plaque dans le milliampéremètre extérieur branché entre 7 et 5, dans sa position inférieure il relie directement la plaque au positif de la pile « B ».

b) Circuit de commande de la grille G_1.

Suivant que le contacteur C_1 sera en position 1, 2 ou 3 le potentiel de la grille de commande va se trouver modifié :

Position 1 Grille négative,

Position 2 Grille positive,

Position 3 Grille zéro.

En sortant de l'inverseur I_{G1} on aboutit au potentiomètre P_1 sur lequel est prise la tension appliquée à la grille. Les extrémités de celui-ci E et S (entrée et sortie) sont reliées à un contacteur C_1 à trois positions.

Position 1.

En cette position le contacteur C_1 relie respectivement c_1 et c'_1 avec 1 et 1'. Le potentiomètre P_1 se trouve réuni aux extrêmités

d'une pile A de 4,5 volts par l'intermédiaire d'un interrupteur R_1. Le positif de cette pile sera normalement relié à la masse, c'est-à-dire au négatif de la pile de polarisation, mais il reste toutefois possible de brancher la pile A dans l'autre sens pour obtenir des polarisations positives de G_1.

Position 2.

En cette position le contacteur C_1 relie respectivement c_1 et c'_1 avec 2 et 2'. Ceci permet d'obtenir plus aisément une polarisation positive de G_1. Celle-ci est prise par le potentiomètre P_1 directement sur la pile de polarisation B de 22,5 volts.

Position 3.

En cette position le contacteur C_1 relie respectivement c_1 et c'_1 avec 3 et 3'. La polarisation de la grille est nulle. En effet 3' n'est relié à rien, tandis que 3 ramène le potentiel de la grille à la masse du chassis.

On peut considérer qu'étant donné la faible intensité du courant grille ceci reste vrai pour toutes les positions du potentiomètre. Il sera toutefois plus correct d'amener le potentiomètre P_1 à la position zéro, ce qui relie la grille au point 1, c'est-à-dire à la masse du chassis.

En résumé, il sera possible de polariser la grille G_1 par n'importe quelle tension comprise entre — 4,5 v. et + 22,5 v. Il est à noter que l'on pourrait éventuellement remplacer la pile de 4,5 v. par toute autre pile, ce qui augmenterait l'échelle des potentiels de polarisation négative.

c) Circuit de commande de la grille écran ou G_2.

Suivant que le contacteur C_2 sera en position 1, 2 ou 3 le potentiel de la grille écran va se trouver modifié :

Position 1 Grille négative,

Position 2 Grille positive,

Position 3 Grille à + 22,5 volts.

En sortant de l'inverseur I G_2 on aboutit au potentiomètre P_2 sur lequel, comme pour G_1, est prise la tension appliquée à la grille

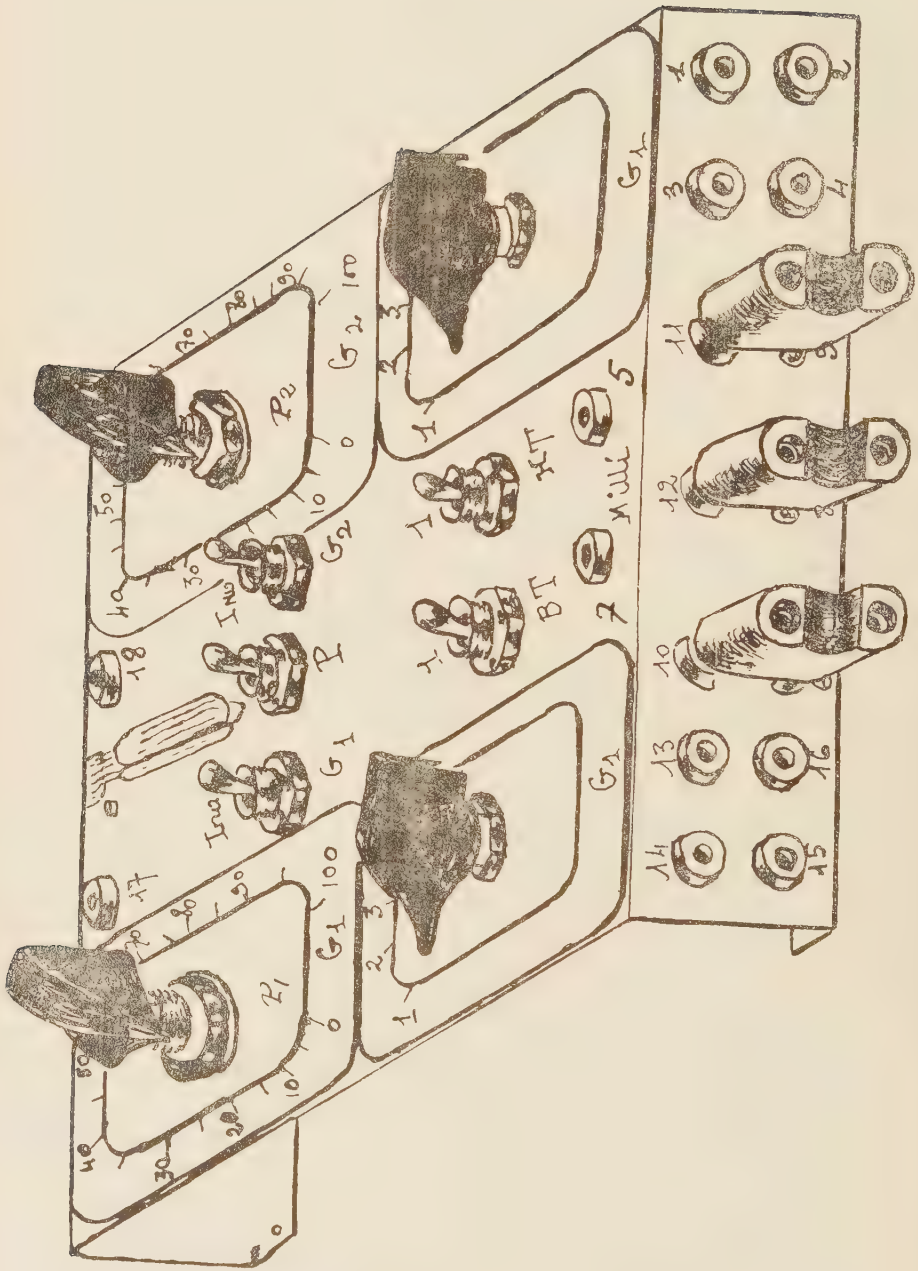


Figure 16

écran G_2. Les extrémités de celui-ci E et S (entrée et sortie) sont reliées à un contacteur C_2 à trois positions.

Position 1.

En cette position le contacteur C_2 relie respectivement c_2 et c'_2 à 1 et 1'. Le potentiomètre P_2 se trouve réuni aux extrémités d'une pile A de 4,5 volts par l'intermédiaire d'un interrupteur R_2. Le positif de cette pile sera normalement relié à la masse, c'est-à-dire au négatif de la pile de polarisation. La grille G_2 prend alors un potentiel négatif compris entre zéro et — 4,5 volts.

Position 2.

En cette position le contacteur C_2 relie respectivement c_2 et c'_2 avec 2 et 2'. Le potentiomètre P_2 se trouve branché sur la pile de polarisation de 22,5 volts. La grille peut prendre alors toutes les polarisations comprises entre 0 volt et + 22,5 volts.

Position 3.

En cette position le contacteur C_2 relie c_2 et c'_2 avec 3 et 3'. Le point 3 n'est réuni à rien tandis que 3' est réuni au positif de la pile de 22,5 volts. Le potentiel de la grille G_2 est sensiblement de 22,5 volts quelle que soit la position du potentiomètre P_2.

Comme précédemment, il sera plus correct de placer le potentiomètre P_2 à la division maxima car dans ces conditions la grille est bien à 22,5 volts.

La position 1 ne présente guère d'intérêt pratique puisque la grille G_2 est généralement utilisée positivement. Elle a toutefois été prévue pour permettre des expériences spéciales. La position 2 permettra de graduer la tension de polarisation entre 0 volt et + 22,5 volts. La troisième position appliquera toujours 22,5 volts à la grille, c'est-à-dire le même potentiel qu'à la plaque, ce qui est fréquent dans beaucoup de montages électroniques.

En résumé :

Les contacteurs C_1 et C_2 étant en

position 1 : G_1 ou G_2 est négatif

position 2 : G_1 ou G_2 est positif

Position 3 : G_1 est à 0 volt et G_2 est à 22,5 volts.

4°) **Tension des différentes électrodes.**

a) Tension filaments.

Il sera possible de noter les différences de potentiel des filaments en branchant un voltmètre entre les bornes 13 et 16.

b) Tension grille de commande G_1.

Il sera possible de noter les différences de potentiel de G_1 en branchant un voltmètre entre les bornes 10 ou 6 et 4.

c) Tension grille écran G_2.

La différence de potentiel sera obtenue pour G_2 en branchant un voltmètre entre les bornes 11 ou 9 et 4.

d) Tension plaque.

Le voltmètre sera branché entre une des deux bornes 12 ou 8 et une des bornes 2 ou 4.

5°) **Réalisation du montage.**

L'appareil représenté sur la figure 16 a été réalisé au laboratoire sur un chassis d'aluminium. Dessiné en perspective, il montre la disposition des différentes pièces. La lampe à étudier prend place sur un support spécial situé au milieu du bord supérieur du plateau. Nous avons réservé la partie gauche au circuit de la grille G_1 et la droite à celui de la grille G_2. On trouve donc de chaque côté, en haut un potentiomètre, et, au dessous, un contacteur à trois positions. Les deux inverseurs de grille sont placés contre le cadran de leurs potentiomètres respectifs. Les deux interrupteurs correspondant à la haute et basse tension se trouvent au voisinage du cadran des contacteurs. Entre les deux inverseurs de grille, celui de la plaque prend place dans l'axe médian et à quelques centimètres au-dessous du support de lampe.

Les douilles 17 et 18 destinées à la pile de 4.5 volts sont fixées en haut du plateau tandis que les deux douilles 7 et 5 du milliampèremètre occupent le bas.

Sur la face avant, on trouve sept couples de douilles.

Les trois coupe-circuit des deux grilles et de la plaque tiennent la partie centrale et sont réalisés par une simple prise de courant mâle. En principe ils sont fixés à demeure, mais peuvent être enlevés dans certains cas spéciaux.

Les deux couples de gauche correspondent à l'alimentation basse tension. Reliées entre elles, les douilles 13 et 14 sont destinées au positif alors que les 15 et 16 le sont au négatif.

Par ailleurs les deux couples de droite correspondent à l'alimentation haute tension. Les douilles 3 et 1, réunies entre elles, sont destinées au positif et les 2 et 4 au négatif.

Tous les circuits représentés sur le schéma sont dissimulés sous ce châssis. Piles de chauffage et de tension plaque sont incorporées dans ce montage.

Notre lampemètre nous a permis l'étude d'un certain nombre de lampes de surdité. A titre d'exemple, nous reproduisons les courbes relatives à la CK 547 DX montée en triode, à partir desquelles nous avons calculé les caractéristiques indiquées sur la figure 17.

6°) **Application pratique.**

a) Calcul de la pente,

b) Calcul de la résistance interne,

c) Calcul du coefficient d'amplification.

a) Calcul de la pente.

La pente étant le rapport d'une variation du courant anodique ΔI à une variation de tension grille Δv qui lui a donné naissance, pour une tension anodique constante, nous obtenons

$$\text{Pente} = \frac{\Delta I}{\Delta v}$$

Nous notons sur notre graphique que pour une tension plaque constante de 22,5 V. nous passons d'un courant anodique de 1,13 mA à 1,83 mA, soit une variation de 0,7 mA, pour une tension de grille passant de 0 v. à + 1 volt.

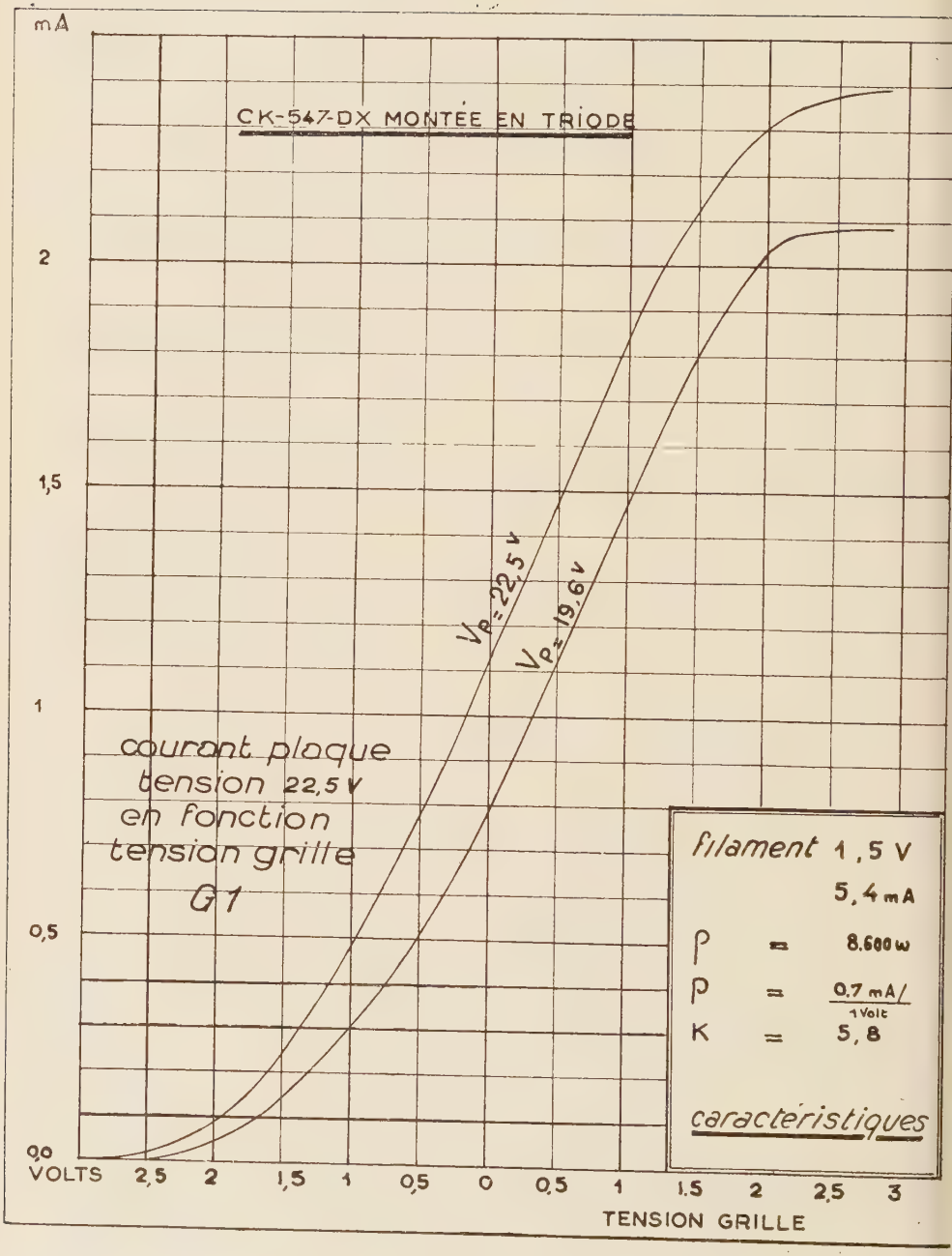

mA
CK-547-DX MONTÉE EN TRIODE
2
1,5
1
0,5
0,0
VOLTS
2,5
2
1,5
1
0,5
0
0,5
1
1,5
2
2,5
3
TENSION GRILLE
$V_P = 22,5$ V
$V_P = 19,6$ V
courant plaque
tension 22,5 V
en fonction
tension grille
G1
filament 1,5 V
5,4 mA
ρ = 8.600 ω
p = 0.7 mA/1 Volt
K = 5,8
caracteristiques

Figure 17

$$\text{Pente} = P = \frac{0{,}7 \text{ mA}}{1 \text{ volt}}$$

b) Calcul de la résistance interne.

La résistance interne étant le rapport de la variation de tension plaque ΔV à la variation de courant anodique ΔI, pour une tension grille constante, nous obtenons.

$$\text{Résistance interne} = \rho = \frac{\Delta V}{\Delta I}$$

Nous notons sur notre graphique que pour une tension plaque de 22,5 V. nous obtenons un courant anodique de 1,13 mA lorsque la tension grille est à zéro volt. Toujours pour cette même tension grille, nous obtenons pour une tension plaque de 19,6 V. un courant anodique de 0,78 mA, soit une variation de courant plaque de 2,9 V. et une variation de courant anodique de 0,35 mA ou 0,00035 Ampère.

$$\rho = \frac{2{,}9 \text{ V}}{0{,}00035} = 8.600 \text{ ohms}$$

c) Calcul du coefficient d'amplification.

Le coefficient d'amplification étant le rapport de la variation de la tension plaque ΔV à la variation de la tension grille Δv correspondante, pour un courant anodique constant nous obtenons

$$\text{Coefficient d'amplification} = K = \frac{\Delta V}{\Delta v}$$

Nous notons sur notre graphique qu'une tension plaque de 22,5 V. et une tension grille de 0,51 v. donnent un courant anodique de 1,5 mA. Ce même courant anodique de 1,5 mA est également obtenu pour une tension plaque de 19,6 V. et une tension grille de 1,01 v., soit une variation de 2,9 V. pour la tension plaque de 0,5 v. pour la tension grille.

$$K = \frac{2{,}9}{0{,}5} = 5{,}8$$

III. — TRANSISTORMÈTRE DESTINÉ A MESURER LES CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES D'UN TRANSISTOR.

A. — CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES.

D'après ce qui a été vu lors de l'étude des transistors, il est important de tracer les caractéristiques courant du collecteur en fonction de la tension de ce dernier pour un courant de base fixe.

Principe :

Pour mesurer les caractéristiques des lampes avec notre lampemètre, nous n'avons fait varier qu'un seul facteur à la fois. Nous pratiquerons la même technique avec notre transistormètre pour la mesure des caractéristiques d'un transistor.

Dans le circuit base-émetteur d'un transistor nous allons faire circuler un courant de base fixe tandis que nous ferons varier la tension du collecteur. Nous noterons pour chaque variation de tension appliquée au collecteur, une variation de courant de celui-ci que nous représenterons par une courbe.

Si nous faisons subir au collecteur les mêmes variations de tension après avoir modifié la valeur du courant de base, que nous maintenons à nouveau constant, nous obtiendrons toute une série de courbes qui constituent les courbes caractéristiques du transistor.

Notre lampemètre avait été construit pour mesurer les différentes variations du courant anodique, en fonction des différentes tensions grille.

Notre transistormètre nous permet de mesurer les différentes variations du courant collecteur en fonction de différentes tensions qui lui sont appliquées pour un courant de base fixe.

B. — DISPOSITIFS RÉALISABLES ET PROPOSÉS POUR LA MESURE DES CARACTÉRISTIQUES.

Ces mesures peuvent être envisagées de deux points de vue différents.

1) Avec oscillographe.

On désire connaître dans un temps très court les caractéristiques complètes. On peut alors utiliser une méthode mettant en jeu un oscillographe cathodique.

SCHEMA DU TRANSISTOMETRE AVEC OSCILLOGRAPHE CATHODIQUE

ROUGE
NOIR
JAUNE
ENTRÉE HORIZONTALE
MASSE
SECTEUR
ENTRÉE VERTICALE DE L'OSCILLOGRAPHE
R = 100 ω
TRANSFO CHAUFFAGE 6V3
CONTACTEUR C.2
C
E
B
ROUGE
VERT
1.5
P.1
ROUGE
NOIR
RHEOSTAT DE 20.000 ω
CONTACTEUR C.1

Figure 18 A

SCHEMA DU TRANSISTOMETRE POUR MESURES STATIQUES SANS OSCILLOGRAPHE

A
P
V
ROUGE
NOIR
JAUNE
COLLECTEUR
MASSE
EMETTEUR

Figure 18 B

2) Sans oscillographe.

Les caractéristiques complètes n'offrent pas d'intérêt pratique. On désire seulement connaître les points particuliers qui permettront de définir rapidement et d'une façon qualitative la valeur d'un transistor. C'est ce dernier point de vue qui sera intéressant pour le Pharmacien-Acousticien.

En effet, ce dispositif moins onéreux pour lui, puisque ne nécessitant pas l'emploi d'un oscillographe cathodique, permet la vérification rapide des caractéristiques d'un transistor.

1°) **Schéma du montage oscillographique** (figure 18 A).

a) Tension d'alimentation du collecteur.

Partant de l'émetteur pour aboutir au collecteur, la tension destinée à ce dernier emprunte le circuit qui comprend successivement le secondaire d'un transformateur de chauffage de 6,3 v., le redresseur L et une résistance de 100 ohms. Celle-ci est reliée d'une part au collecteur et d'autre part à la masse du chassis.

En réalité, le redresseur L à oxyde de cuivre est intercallé par l'intermédiaire du contacteur C_2. Ce dernier joue le rôle d'interrupteur et d'inverseur de polarité.

b) Courant d'alimentation de la base.

Partant de l'émetteur un second circuit rejoint la base. Il comprend successivement un contacteur C_1 et une pile incorporée de 1,5 v. ou une alimentation extérieure. Il se continue par une résistance variable obtenue à partir d'un potentiomètre de 20.000 ohms monté en rhéostat.

2°) **Schéma du montage pour mesures statiques** (figure 18 B).

Si on désire substituer à l'oscillographe des appareils de mesure, il faut mettre hors circuit le secondaire du transformateur, le redresseur et la résistance de 100 ohms. Ceci est réalisé au moyen du contacteur C_2, en position 1

a) Tension d'alimentation du collecteur.

En intercalant un circuit spécial entre la sortie horizontale

(douille jaune) et la sortie verticale (douille rouge) donc en fait entre l'émetteur et le collecteur, nous allons pouvoir porter le collecteur à des tensions différentes et pratiquer ainsi nos mesures statiques.

Ce circuit spécial est constitué par un milliampèremètre A et un générateur P comportant une série d'éléments de piles aux bornes duquel sera placé un voltmètre.

b) Courant d'alimentation de la base.

Le circuit émetteur-base reste identique à celui conçu pour le montage oscillographique.

C. — DESCRIPTION ET RÉALISATION DU MONTAGE (figure 19).

1°) **Chassis du transistormètre.**

Tout ce montage est réalisé sur un chassis d'aluminium de mêmes dimensions que celui du lampemètre : 12 cms x 16 cms.

2°) **Courant d'alimentation de la base.**

Nous avons prévu que l'alimentation par piles pouvait être réalisée par des éléments incorporés ou extérieurs.

a) Alimentation extérieure.

Le courant d'un générateur peut être amené par deux douilles, l'une verte, l'autre rouge, situées par la face arrière gauche du châssis.

b) Alimentation incorporée.

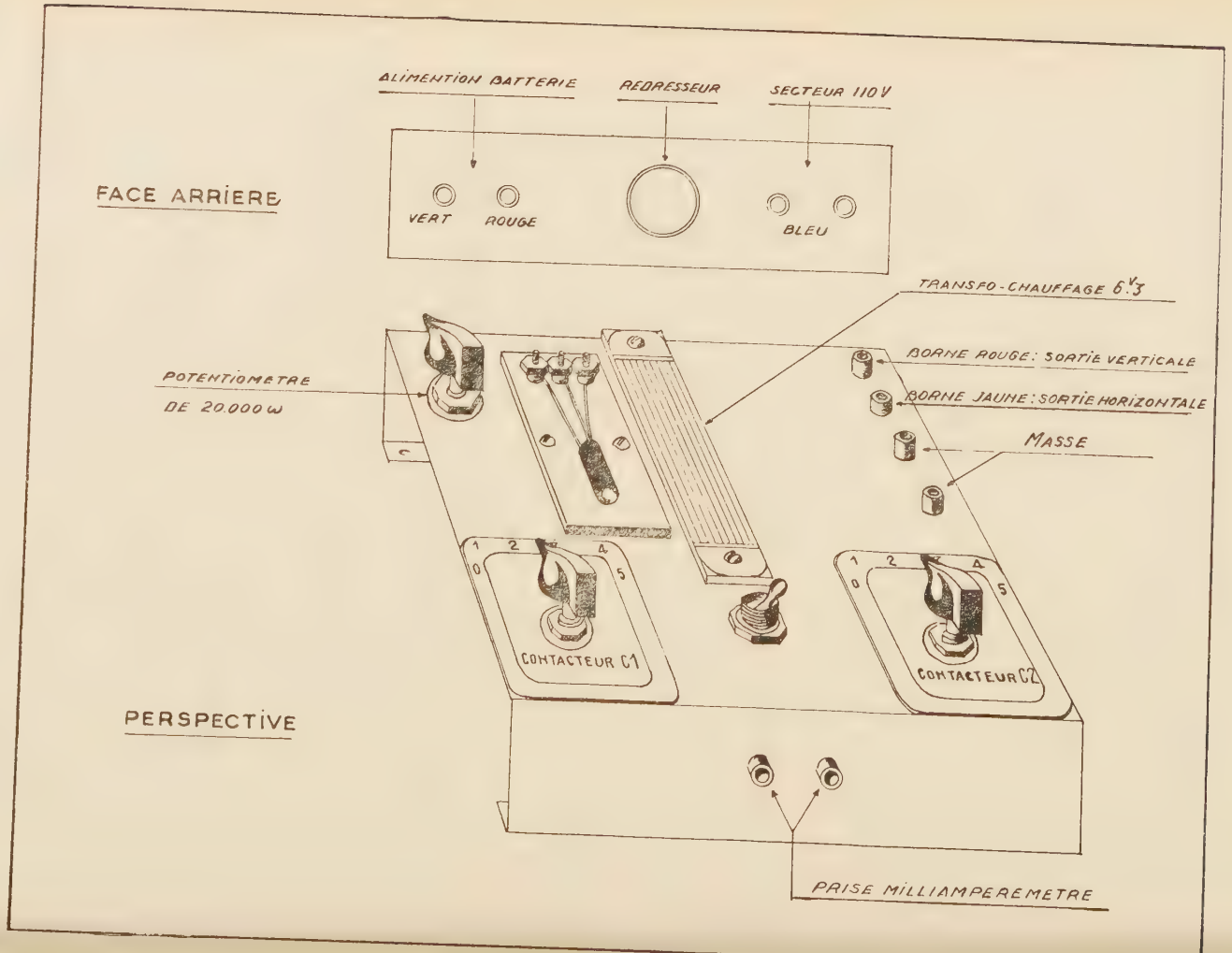
Une pile de 1,5 v. peut être fixée sous le chassis et commandée par le contacteur C_1.

3°) **Contacteur C_1.**

Situé en bas et à gauche du châssis, ce contacteur à deux circuits, quatre positions, permet les combinaisons suivantes :

Position I : Il joue le rôle d'interrupteur.

Position II : Il met en circuit la pile incorporée, son négatif étant appliqué à la base.


ALIMENTION BATTERIE
REDRESSEUR
SECTEUR 110 V
FACE ARRIERE
VERT
ROUGE
BLEU
TRANSFO-CHAUFFAGE 6.3 V
POTENTIOMETRE
DE 20.000 ω
BORNE ROUGE: SORTIE VERTICALE
BORNE JAUNE: SORTIE HORIZONTALE
MASSE
CONTACTEUR C1
CONTACTEUR C2
PERSPECTIVE
PRISE MILLIAMPEREMETRE

Position III : Il met également en circuit la pile incorporée, mais son positif est appliqué à la base.

Position IV : Il met l'alimentation extérieure en circuit. Dans ce cas le potentiel de la douille verte est appliqué à la base.

De cette façon, l'appareil permettra d'étudier soit des transistors du type PNP, soit éventuellement des transistors du type NPN.

4°) **Potentiomètre de 20.000 Ohms.**

Le bouton commandant le potentiomètre de 20.000 ohms est situé en haut et à droite du châssis. Sa résistance variable permet une modification du courant base.

5°) **Contacteur C_2.**

Il est situé en bas et à droite du châssis. Comportant également deux circuits quatre positions, il permet les combinaisons suivantes :

Position I : Il met hors circuit le secondaire du transformateur, le redresseur L et la résistance de 100 ohms.

Position II : Il branche le redresseur pour relier le positif à l'émetteur.

Position III : Il inverse le dispositif II et polarise négativement l'émetteur.

Position IV : Cette position n'est pas utilisée, mais permettrait de remplacer le redresseur par tout autre dispositif extérieur.

6°) **Tension d'alimentation du collecteur.**

a) Mesures oscillographiques.

A l'arrière gauche du châssis, deux douilles bleues amènent le courant au primaire du transformateur de chauffage. Ce dernier est situé au milieu du châssis entre le bouton du potentiomètre et une série de quatre douilles.

b) Mesures statiques.

Dans les douilles rouge et jaune, situées en haut et à droite du

châssis s'insèrent les éléments d'un générateur qui fournira au collecteur ses différentes tensions.

7°) **Branchement de l'oscillographe.**

Deux douilles noires prennent place entre les douilles rouge et jaune. Elles correspondent toutes deux à la masse du châssis.

Les douilles rouge et noires donnent accès aux extrémités de la résistance de 100 ohms. Elles permettent de prélever aux bornes de celle-ci une différence de potentiel qui sera proportionnelle à l'intensité qui la traverse.

C'est cette différence de potentiel que l'on appliquera à l'amplificateur vertical de l'oscillographe par la douille rouge. La douille noire sera réunie à la masse de l'oscillographe.

La douille jaune est réunie à l'entrée du secondaire du transformateur. La tension de ce dernier sera envoyée au balayage horizontal.

La résultante observée sur l'écran de l'oscillographe sera la caractéristique I_c (intensité du courant du collecteur) en fonction de V_c (tension du collecteur).

8°) **Fixation du transistor.**

Les transistors à mesurer prennent place sur un support situé entre le bouton du potentiomètre et le transformateur. Ce support est réalisé par trois bornes attenant à une plaque de matière isolante, ou fixées sur un support universel pour transistor.

D. — UTILISATION DE L'APPAREIL.

L'appareil ainsi constitué permet d'étudier soit des transistors de fabrication courante PNP soit éventuellement des transistors NPN.

1°) **Usage de l'appareil en liaison avec un oscillographe cathodique.**

L'oscillographe ayant été branché comme il convient et le transformateur étant réuni au secteur, la position du contacteur C_1 va déterminer la polarisation positive ou négative de la base.

a) Position du contacteur C_1.

a') Cas du transistor P.N.P.

Position I : Il joue le rôle d'interrupteur.

Position II : La pile incorporée de 1,5 v. est orientée positif vers l'émetteur.

Position IV : L'alimentation extérieure est branchée

positif borne rouge

négatif borne verte.

b') Cas du transistor NPN.

Position I : Il joue le rôle d'interrupteur.

Position III : La pile incorporée de 1,5 v. est orientée positif vers la base.

Position IV : L'alimentation extérieure est branchée. Il convient de brancher le positif de la pile extérieure

négatif borne rouge

positif borne verte.

b) Position du contacteur C_2.

a') Cas du transistor P.N.P.

Position I : Il joue le rôle d'interrupteur.

Position III : Il donne la tension d'alimentation aux transistors du type habituel par l'intermédiaire du redresseur à oxyde de cuivre.

b') Cas du transistor NPN.

Position I : Il joue le rôle d'interrupteur.

Position II : Il donne une tension inverse de la position III qui n'est utilisée que pour les transistors du type N.P.N.

E. — APPLICATION PRATIQUE.

Avec notre lampemètre nous avons obtenus les valeurs numériques d'un transistor O.C 71 qui sont présentées page 92, à titre d'exemple, sous forme d'un tableau synoptique avec graphique correspondant (figure 20).

VALEURS NUMERIQUES OBTENUES AVEC UN TRANSISTOR O.C.71

Pour un courant de base constant et d'une valeur de 100 µA | 200 µA | 300 µA

Tension collecteur Volts:	Courant collecteur mA	mA	mA
0,3	5	5	5
0,5	7,5	10	10
1	8	14	19,5
1,5			20,5
2	8,5	15,5	21
4	9,5	16,5	22,5
6	11	18,25	25
8	15	22,5	30

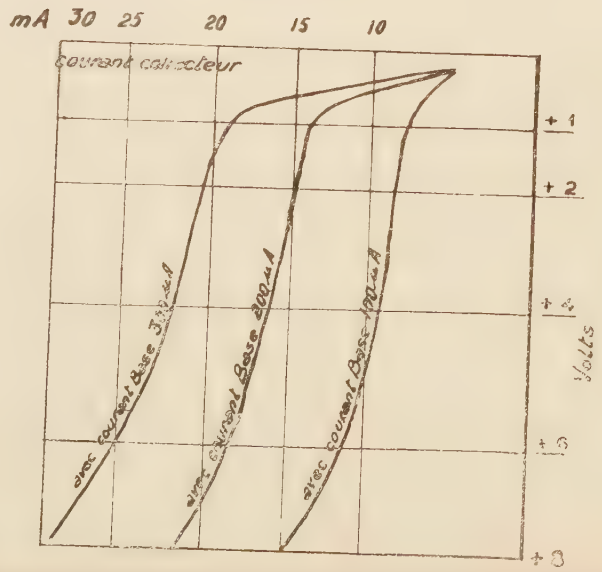


Figure 20

IV. — ALTÉRATION DES CARACTÉRISTIQUES QU'UN USAGE PROLONGÉ AMÈNE DANS LES APPAREILS DE PROTHÈSE AUDITIVE.

La réparation d'un appareil de prothèse modifie toujours tant soit peu la courbe de réponse initiale de celui-ci. A cela rien de surprenant puisque dans le domaine du « subminiature » les pièces détachées ne sont pas rigoureusement identiques entre elles et qu'une certaine tolérance est admise officiellement.

Le sourd doit donc faire un effort pour s'adapter aux modifications inévitables qu'a subies la courbe de réponse de son appareil quand celui-ci a dû être réparé.

Sans réparation certaines pièces se modifient et il est certain que l'usure doit avoir une action sur cette courbe.

La question se pose donc de savoir si durant l'utilisation normale d'un appareil de prothèse, des modifications sensibles peuvent se produire en quelques années. Les techniciens n'ont pas réalisé une documentation sur ce point qui intéresse les usagers. A cela rien de surprenant puisque les appareils de surdité sont en perpétuelle évolution et se démodent rapidement tandis que l'oreille du malentendant change aussi de son côté.

Il serait donc souhaitable de pouvoir soumettre des appareils de surdité à l'épreuve d'un usage contrôlé dans des conditions identiques pour tous en disposant de plusieurs utilisateurs pour chaque type, afin de pouvoir dresser une statistique. Une telle expérience, faite suivant les règles habituelles lorsqu'il s'agit d'établir des résultats moyens, aurait nécessité un nombre prohibitif d'appareils de surdité, qui dépassait nos possibilités.

Aussi, nous sommes-nous limités à une sorte de sondage procédant sur quatre appareils, que nous avons soumis à un fonctionnement intensif.

Nous devons à l'obligeance de Messieurs CHAVASSE et LEHMANN d'avoir eu la possibilité de faire pratiquer sur nos appareils les mesures qui nous étaient indispensables, avant et après expériences, dans leur laboratoire d'acoustique du Centre National d'Etude des Télécommunications (C.N.E.T.).

COURBES DE REPONSE ENREGISTREES AU LABORATOIRE DU C.N.E.T :

APPAREIL B

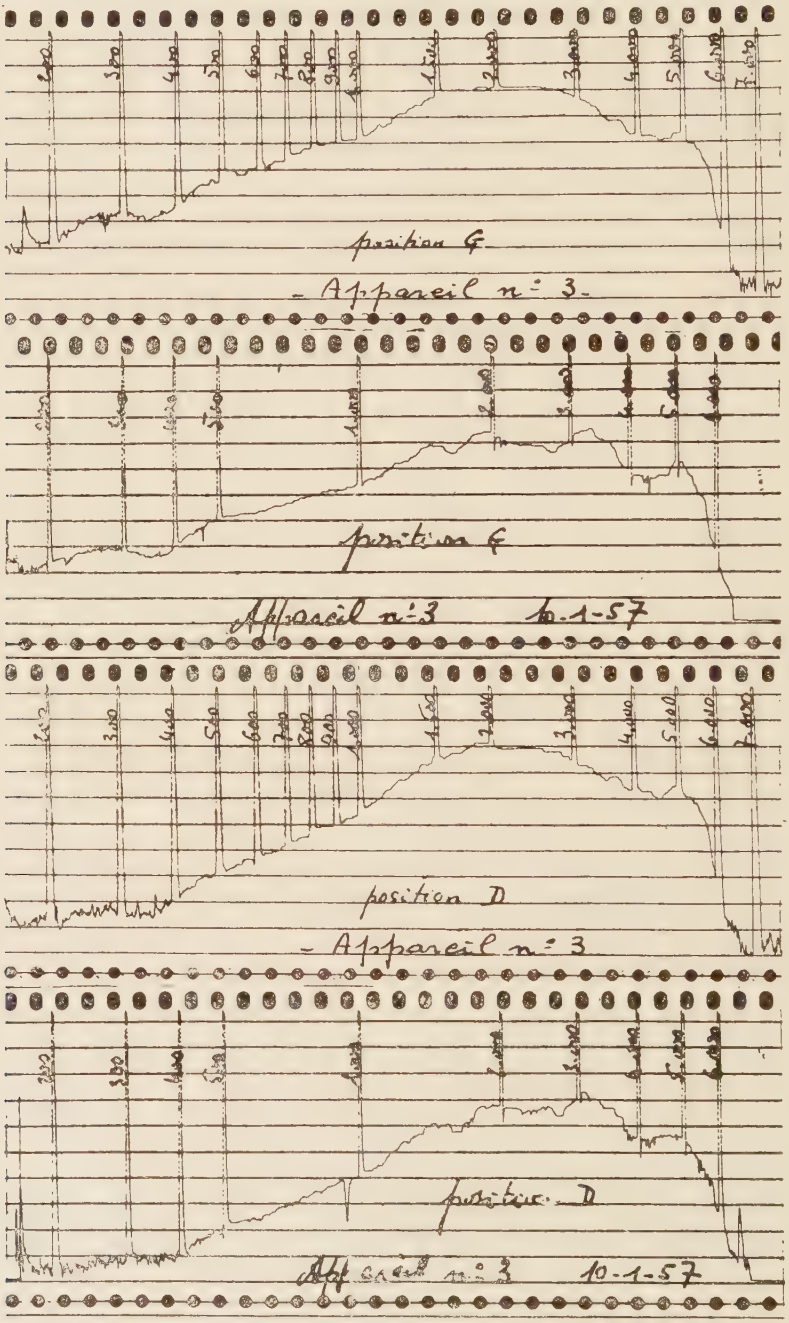


Figure 21

CURBES DE REPONSE ENREGISTREES AU LABORATOIRE DU C.N.E.T :

APPAREIL C

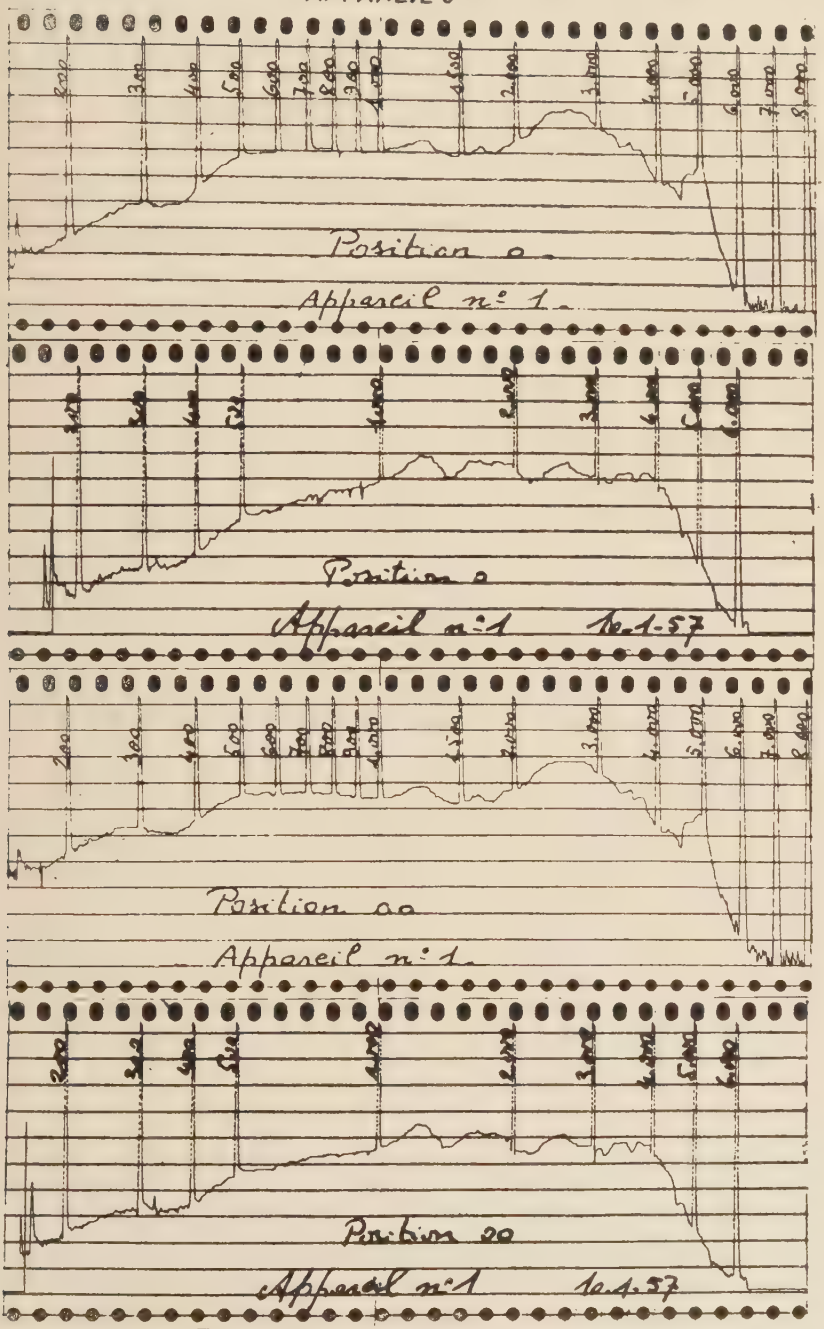


Figure 22

Pour réaliser ce fonctionnement intensif il ne pouvait être question d'utiliser l'alimentation normale par pile, d'abord trop onéreuse, puis nécessitant des contrôles continuels de tension. C'est pourquoi nous avons construit une alimentation sur secteur.

Nous exposerons successivement :

1) Le principe de la méthode des différentes mesures effectuées au département acoustique du C.N.E.T.

2) Les caractéristiques des appareils utilisés.

3) L'alimentation pour la marche prolongée de nos appareils.

4) Les résultats obtenus.

5) Les conclusions.

A. — PRINCIPE DE LA MÉTHODE DES DIFFÉRENTES MESURES EFFECTUÉES AU DÉPARTEMENT ACOUSTIQUE DU C.N.E.T.

Le Journal Officiel du 19 juin 1955 (16) a publié la méthode normale qui devait être suivie pour la mesure de la courbe de réponse en fonction de la fréquence, pour la mesure de la distorsion harmonique et celle du gain acoustique.

Il précise également les normes auxquelles les appareils de prothèse auditive doivent satisfaire en vue de recevoir l'agrément des collectivités.

On trouvera les détails de ces mesures dans une conférence de CHAVASSE **(4).**

P. CHAVASSE, R. LEHMANN et C. BONHOMET (6) ont mis au point ces mesures. Nous avons emprunté à ces auteurs les renseignements dont nous avions besoin pour notre travail.

1°) **Courbe de réponse en fonction de la fréquence.**

L'appareil de surdité à mesurer est placé à l'intérieur d'une chambre de propagation réalisant les conditions de champ acoustique libre. Des matériaux très absorbants recouvrent ses parois.

Ces mesures sont faites pour les tensions normales des piles d'alimentation des appareils dont on relève la courbe et pour un niveau sonore bien défini et constant à l'émission quelle que soit la fréquence (50 db au-dessus de 2.10^{-4} baryes).

La pression acoustique accompagnant l'intensité sonore est exprimée en barye ou dynes cm^2. Cette unité est de l'ordre du millionième d'atmosphère.

Le potentiomètre de gain de l'appareil est réglé au maximum.

Le son est émis par un petit haut-parleur placé au fond d'une cavité imitant la forme de la bouche, ménagée dans un volume reproduisant extérieurement une tête humaine (*) (6).

La distance entre l'appareil de prothèse à mesurer et le haut-parleur d'émission est également déterminée avec précision et égale à 1 mètre.

L'écouteur de l'appareil de surdité est appliqué sur un coupleur formant oreille artificielle, dont le volume est de 2 cm^3 (**) de façon aussi étanche que possible. Afin d'opérer dans des conditions constantes, une masse de 200 grammes est posée sur lui.

La fréquence varie lentement, régulièrement et automatiquement de 200 à 6.000 Hz en deux minutes environ.

Les courants produits par le microphone de cette oreille sont envoyés à un amplificateur auquel est associé un enregistreur dont le déroulement du papier est synchrone du mouvement de l'oscillateur basse fréquence alimentant le haut-parleur.

Cet enregistrement permet d'inscrire automatiquement la caractéristique de réponse recherchée.

Si l'appareil de prothèse possède diverses positions de tonalité, une courbe de réponse sera relevée pour chacune d'elles.

(*) Les unités de mesure que nous utiliserons pour opérer le relevé de la courbe de réponse ont fait l'objet d'une conférence à la Faculté de Pharmacie de Paris par QUOIDEBACH G. (22) à l'occasion du Congrès UTI d'octobre 1957.

(**) On trouvera une description de l'oreille artificielle dans la conférence déjà citée (6).

2°) **Mesure de la distorsion harmonique.**

Dans les mêmes conditions que pour le relevé de la courbe de réponse, la distorsion harmonique est effectuée à la fréquence 1.000 Hz. Cette mesure a pour but d'étudier si l'appareil reproduit fidèlement la fréquence qui lui est fournie ou si, au contraire, il crée des fréquences n'existant pas dans l'onde acoustique qu'il reçoit. Cette mesure est exécutée à l'aide d'un distorsiomètre ou d'un analyseur de fréquences pour les diverses positions de tonalité et pour le gain maximum de l'appareil. Le résultat est exprimé en pour cent et il doit être, pour un appareil convenable, inférieur à 10 % dans les conditions d'essai.

3°) **Mesure du gain acoustique.**

Cet essai a pour but de mettre en évidence la puissance de l'appareil. Il est exécuté dans les mêmes conditions que les deux mesures précédentes.

Le gain se définit comme étant la différence entre la pression sonore fournie par l'écouteur sur l'oreille artificielle et la pression sonore existant à l'emplacement du microphone de l'appareil de prothèse essayé, lorsque cet appareil est retiré du champ acoustique de mesure.

B. — CARACTÉRISTIQUES DES APPAREILS UTILISÉS.

Nous avons mis en service quatre appareils entièrement neufs. Deux sont du types à lampes : nous les désignerons par les lettres A et B. Deux sont du type à transistors : nous les désignerons par les lettres C et D.

Neufs, ces appareils ont été examinés à Paris au C.N.E.T. sous la direction de Monsieur R. LEHMANN, Ingénieur du département acoustique de ce service technique.

Les résultats ont été les suivants :

APPAREIL A.

Pour la position « un point » du potentiomètre : gain de 46 db, avec une distorsion harmonique de 6,5 à 7,5 % à 400 Hz et de 5 % à 1.000 Hz.

APPAREIL B.

Avec compression : 30 db,

Sans compression : 35 db.

Avec compression : distorsion harmonique de :

5 à 6 % à 600 Hz,

3 à 3,5 % à 1.000 Hz.

Sans compression : distorsion harmonique de :

7 à 8 % à 600 Hz,

3 à 4 % à 1.000 Hz.

APPAREIL **C.**

1) **En position** ° : 56 db avec distorsion harmonique de :

5 à 6 % à 400 Hz,

3,5 à 4 % à 1.000 Hz.

2) **En position** °° : 54 db, avec une distorsion harmonique de :

4 à 5 % à 400 Hz,

3,5 à 4 % à 1.000 Hz.

APPAREIL D.

I — Avec **une seule pile « R.M.I.** » (Mallory battery)

1) **En position H :** 33 db avec une distorsion harmonique de :

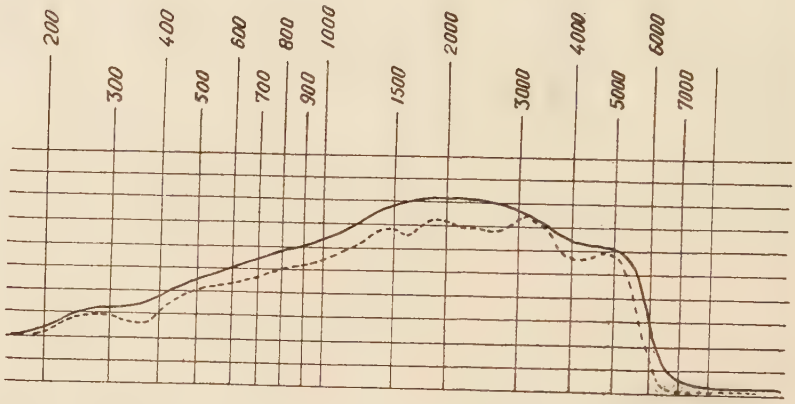
7,5 à 8 % à 400 Hz,

2,5 à 3 % à 1.000 Hz.

2) **En position B :** 30 db avec une distorsion harmonique de :

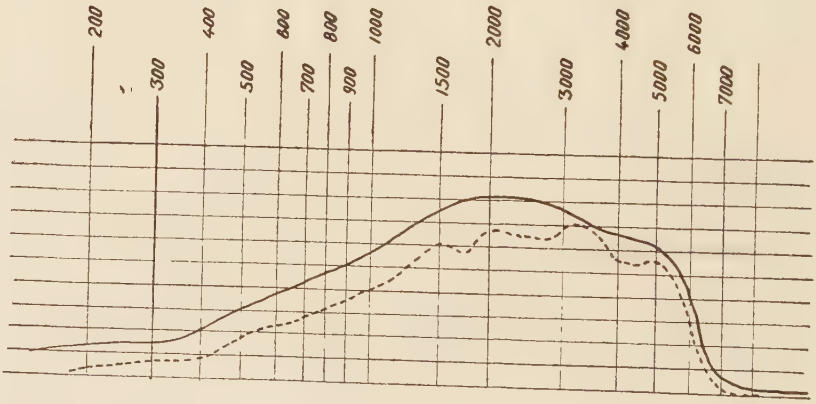
5 à 6 % à 500 Hz,

2 à 3 % à 1.000 Hz.



appareil B
(position G)

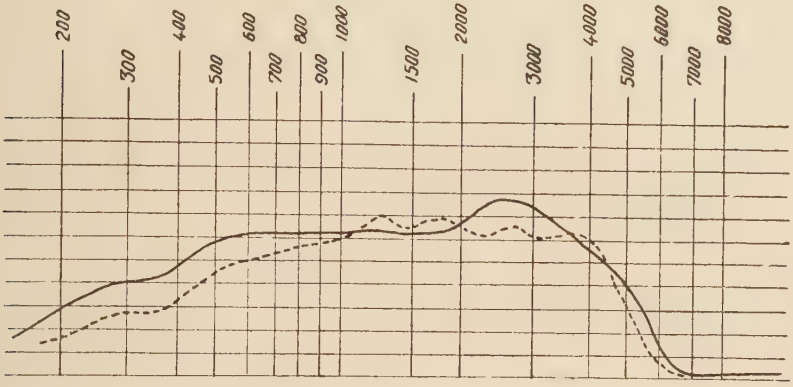
avant
après



appareil B
(position D)

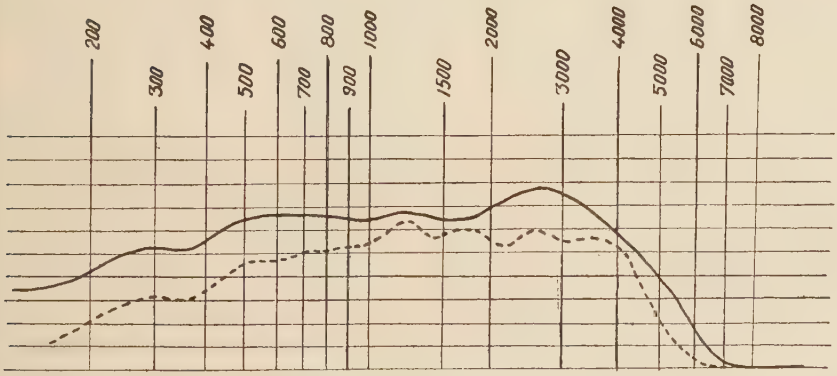
avant
après

Figure 23



appareil C
(position 0)

avant
après



appareil C
(position 00)

avant
après

Figure 24

II. — Avec **deux piles** R.M.I. :

1) **En position H :** 42 db,

2) **En position B** : 38 db.

Les appareils sont définis par leurs courbes de réponse, mesurées avant l'expérience, reproduites au moment de la comparaison.

C. — ALIMENTATION SUR SECTEUR POUR LA MARCHE PROLONGÉE DE CES APPAREILS.

Nos appareils nécessitant l'emploi d'une tension de 1,5 V. pour le chauffage des tubes et pour les montages à transistors, ainsi que des tensions de 22,5 V. (ou plus sur certains appareils) pour les circuits-plaque, nous nous sommes adressés à un type de montage habituel pour alimenter sur le secteur les postes de T.S.F. à piles. En effet, nous pouvions ainsi disposer d'un matériel courant et il nous était loisible d'abaisser la tension-plaque à la valeur voulue à l'aide de résistances.

Nous avons ainsi réalisé un montage fourni en pièces détachées par les établissements PERLOR-RADIO, montage que nous avons adapté à nos fins (figure 26).

1°) **Sources de tension.**

Un transformateur de chauffage 2 x 2,5 V. a un primaire comportant des prises à 90, 110 et 220 V. (figure 25). Un cavalier avec fusible permet ainsi d'adapter le montage aux secteurs 110 ou 220 V., tandis qu'un interrupteur général I en commande le fonctionnement.

Les deux alternances du circuit de chauffage des filaments sont redressées par un double redresseur sec M et M'. Le filtrage est classique : il se fait par deux condensateurs de 2.000 μF, C_1 et C_2, et par une self à fer S de 5 henrys. Le négatif est mis à la masse.

On a ainsi économisé l'emploi d'un secondaire haute tension en prélevant le courant entre l'entrée du primaire et la prise 90 V. Ceci présente toutefois un inconvénient, celui de mettre un des deux

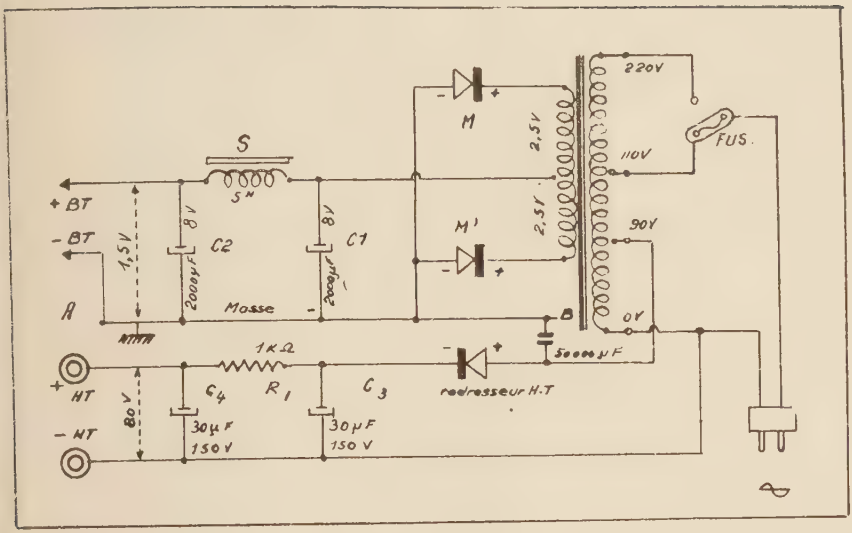


Figure 25

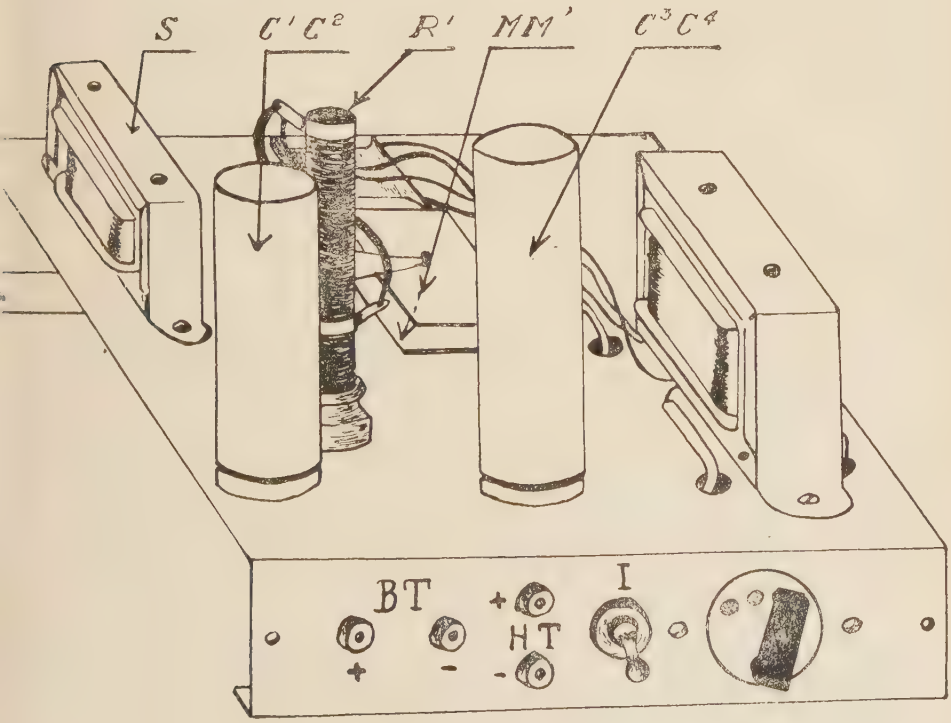


Figure 26

pôles de la haute tension au secteur, d'où un certain danger dans la manipulation. Cet inconvénient ne joue pratiquement pas ici puisque l'appareil est destiné à fonctionner tout seul et non à permettre la réalisation des mesures en cours de marche.

Une seule alternance est redressée grâce à un second redresseur sec et la tension obtenue est également filtrée par deux condensateurs C_3 et C_1, mais par une simple résistance de 1.000 ohms R_1. Le positif de la haute tension est réuni à la masse AB par un condensateur de 50.000 μ F, ce qui laisse la possibilité éventuelle d'isoler les deux circuits l'un de l'autre.

L'ensemble est réalisé sur un châssis d'aluminium de 12 cm x 16 cm. avec deux rebords verticaux de 5 cm. Il est représenté en perspective sur la figure 21. On y reconnaît les différentes pièces constitutives.

Sur la face verticale avant on aperçoit donc 4 douilles de sortie : + BT, — BT, + HT, — HT, l'interrupteur I et la prise avec son cavalier. Le fil du secteur arrive au centre de l'autre face verticale.

2°) **adaptation des tensions.**

Deux autres petits châssis ont été prévus pour être associés à l'appareil précédent, châssis dont le but est de porter les résistances mises en série.

Pour la basse tension un rhéostat de 500 ohms remplit cet office. Il est réglé en fonction des appareils mis en parallèle sur cette B.T. Pour la haute tension, on a utilisé en série une résistance fixe de 50.000 ohms et un rhéostat de 250.000 ohms.

D. — RÉSULTATS OBTENUS.

Les quatre appareils A, B, C et D ont préalablement été étudiés au C.N.E.T. Ils ont ensuite été soumis à l'épreuve d'un fonctionnement intensif durant 90 jours à raison de 23 heures par jour.

Sur les quatre, deux ont cessé de fonctionner peu de temps avant la fin de cette épreuve pour des causes accidentelles, mais vraisemblablement dûes à l'usure :

Appareil A

Fil coupé dans les circuits externes, écouteur décentré.

Appareil D.

Transformateur de sortie coupé, un tube DL-67 coupé.

Ainsi les seules conclusions que l'on puisse tirer se rapportent aux appareils B et C :

Appareil B.

La figure 21 reproduit les quatre courbes de cet appareil en position G et D avant et après l'épreuve.

Appareil C.

La figure 22 reproduit les quatre courbes de cet appareil en position ^{0} et ^{00} avant et après l'épreuve.

Dans tous ces cas, les photographies sont décalées latéralement pour assurer la concordance de la fréquence 1.000.

Afin de pouvoir discuter des résultats obtenus, nous avons reproduit les courbes de réponse schématisées pour éliminer les variations accidentelles, en les groupant 2 par 2 pour chaque appareil, pour une même position avant et après l'épreuve.

Appareil B.

La figure 23 se rapporte à l'appareil B. L'usure se traduit par une diminution générale du gain, plus accentuée toutefois dans la position D que dans la position G.

En outre, c'est surtout au-dessous de 3.000 Hz que la diminution est importante. Les secondes courbes sont d'ailleurs un peu moins régulières que les premières, mais on peut apprécier d'une façon générale les décalages comme étant en moyenne de 4 db pour la position G et de 6 db pour la position D.

Appareil C.

La figure 24 se rapporte à l'appareil C. Là encore l'usure n'a pas amélioré l'appareil, mais les courbes se sont davantage déformées.

On constate en particulier que la perte de gain est faible, — peut-être même en certains points une légère amélioration — entre 1.000 et 2.000 Hz. Au-dessous de 1.000 Hz, la perte augmente de 7 db en position ° et de 10 db en position °° quand la fréquence diminue pour devenir sensiblement constante après 600 Hz. Au-dessus de 2.000 Hz la perte passe par un maximum un peu au-dessous de 3.000 Hz reprenant celle déjà constatée de 7 db en position ° et 10 db en position °°.

CONCLUSIONS.

Ces expériences font bien ressortir, qu'après un usage d'une ou plusieurs années, les appareils se sont modifiés, ce qui est évident.

Il est pourtant difficile de tirer des conclusions valables de ces deux exemples.

Il semble que la déformation de la courbe de réponse n'apporte qu'une perte de gain assez faible. Cette déformation ne paraît pas modifier malgré tout l'allure générale de la courbe de réponse qui est propre à chaque appareil.

Toutefois, s'il s'agissait d'un appareil ayant subi le même usage et, de plus, une ou plusieurs réparations, nous serions amenés à faire des réserves sur les modifications de sa courbe de réponse.

Il est évident que le changement d'un composant de l'appareil, compte tenu des tolérances admises dans les pièces miniatures, aura pour conséquence une modification des résultats acoustiques.

Tenant compte que deux appareils d'une même série n'ont pas leur courbe de réponse absolument superposable, que la courbe propre à chaque appareil n'est pas délivrée lors de la vente, on doit s'attendre à ce que le sourd soit sensible aux modifications qu'apporte un usage prolongé et davantage encore à celles qu'apporte une réparation.

Mais seule l'expérieuce peut permettre de répondre à la question de savoir si des modifications de détail relatives à la forme de la courbe ont une importance déterminante dans la correction de la surdité.

Nous pensons, quant à nous, que le sourd est sensible à ces

modifications de détail, mais que l'appareil ne cesse pas de convenir à la correction de sa surdité.

Etant donné qu'il y a modification de la courbe de réponse après usage prolongé, nous pensons que le technicien devrait pouvoir disposer de la courbe de réponse originale pour conclure sa réparation électronique par le rétablissement des caractéristiques acoustiques de départ.

Nous croyons avoir surtout posé là un problème qui ne pourrait être résolu que si un centre important de production et de réparation pouvait faire les mesures correspondantes sur tous les appareils qu'il a à sa disposition.

En particulier, il serait intéressant de vérifier si, comme dans ces deux exemples, c'est la courbe des appareils à transistors (ici appareil C) qui se déforme davantage que celle des appareils à lampes (ici appareil B).

D'autre part il faudrait vérifier systématiquement si, comme sur cet exemple, les appareils à transistors subissent une usure aussi grande, si ce n'est plus, que les appareils à lampes, ce qui est contraire à ce qu'on pourrait attendre des notions couramment admises sur les transistors.

CONCLUSION

Nombreux sont les problèmes qui se posent à l'acousticien dans le domaine de l'électronique. Le présent travail a eu pour but l'examen de certains d'entre eux sous leur aspect purement physique.

Nous avons tenu tout d'abord à montrer que la technique pure ne devait pas faire méconnaître les problèmes humains qui s'attachent à la surdité et que côtoie chaque jour le pharmacien.

Il était indispensable de rappeler comment se produit le son, comment il se propage, et par quel mécanisme l'oreille le perçoit et l'interprète. C'est pourquoi nous avons tout d'abord donné la définition des principales caractéristiques du son, puis celles plus particulières de l'impédance acoustique et des résonateurs.

La description anatomique de l'oreille nous aide à mieux comprendre comment celle-ci fonctionne comme adaptateur d'impédance entre l'air ambiant et les milieux liquides en contact avec les ramifications terminales du nerf auditif.

Par leur manque de souplesse et de possibilités, les anciens dispositifs acoustiques et les prothèses électriques avec microphone à charbon se sont révélés insuffisants.

Avec l'introduction d'une amplification par lampes et mieux encore par transistors, un progrès énorme a été réalisé. Permettant une adaptation plus particulière à chaque malade, les appareils électroniques restituent un confort recréant souvent le mode de vie antérieure du sourd.

Ces avantages sont obtenus au prix de montages électroniques complexes, par ailleurs « miniaturisés » à l'extrême, pour le confort de l'usager. Mais souvent en contre partie le fonctionnement de l'appareil est totalement arrêté par des déréglages bénins.

Bien qu'actuellement les prothèses à lampes soient en voie de disparition, il importait cependant de préciser leurs principales causes de panne. De toutes les pièces ce sont les lampes qui se modifient le plus vite. Aussi avons-nous proposé un montage spécialement adapté au contrôle de ce genre de tubes. Sa construction a été envisagée pour permettre aussi bien l'étude complète d'une lampe que certains examens particuliers qui se posent lors d'un remplacement éventuel.

Les appareils à transistors ont sur les précédents l'avantage d'une consommation en piles beaucoup moindre. De ce fait la dépense pour leur alimentation devient presque négligeable.

Pour le technicien, le transistor est un dispositif récent, en pleine évolution et pour lequel il manque encore le recul du temps pour apprécier sa longévité qui apparaît cependant dès maintenant très supérieure à celle des tubes.

Son fonctionnement est basé sur les propriétés des semi-conducteurs qui ne peuvent s'expliquer que par l'emploi de la mécanique ondulatoire. Les transistors étant d'une complexité bien supérieure à celle des tubes, nous avons cru utile de rappeler les grandes lignes de leur théorie. Nous avons pu montrer ainsi comment, dans la pratique, certaines mesures relativement simples permettaient de vérifier leurs qualités, à condition toutefois de ne pas trop s'écarter des conditions habituelles d'emploi.

C'est ainsi que nous avons construit un montage qui permet non seulement de tracer l'ensemble des caractéristiques ou de les faire apparaître sur l'écran d'un oscillographe cathodique, mais qui se prête également à des mesures de vérifications en série.

Il importait enfin de savoir si un appareil, auquel le sourd s'était habitué, conservait ses qualités initiales ou subissait des modifications appréciables après un temps plus ou moins long.

Nous avons donc soumis à un usage intensif quatre appareils (deux à lampes, deux à transistors) en demandant au C.N.E.T. de bien vouloir en relever les courbes de réponse avant et après.

Dans ce but, nous avons été amenés à construire un dispositif pour les alimenter sur secteur.

Les expériences ont montré que ce fonctionnement intensif ne semblait pas modifier la courbe de réponse, mais diminuait assez uniformément l'amplification. Sur deux exemples, on ne peut conclure que les appareils à transistors résistent mieux ou plus mal de ce point de vue, que les appareils à lampes.

Ces résultats confirmeraient l'opinion de bon nombre d'utilisateurs. Tout appareil neuf et choisi judicieusement restitue initialement une audition confortable et merveilleuse. Dans les quelques années qui suivent la satisfaction initiale semblerait s'atténuer plus ou moins. Il paraîtrait équitable d'en attribuer la cause à la fois à l'appareil et à l'évolution propre de la surdité.

BIBLIOGRAPHIE

1) **ABOULKER P.** — « Acoustique et Physiologie de l'appareil de transmission », p. 3, Cours International d'audiologie clinique - Paris, 1952, Maloine éd.

2) **BOCCA E.** — « La prothèse auditive » - La surdité, sa mesure et sa correction - Paris, 1952, Maloine éd.

3) **BOURGEOIS R.** — « Classification générale des surdités », p. 291 - Paris, 1952, Maloine éd.

4) **CHAVASSE P.** — « Acoustique et psychophysique de l'auditeur » - Paris, 1952, Maloine éd.

5) **CHAVASSE P. et LEHMANN R.** — « Cours international de phonologie et de phoniatrie » - Paris, 1953, Maloine éd.

6) **CHAVASSE P., LEHMANN R. et BONHOMET.** — « Mesures électroacoustiques ». - Cours International d'audiologie clinique - Paris, 1952, Maloine éd.

7) **CHAVASSE P., PORTMANN M., LEHMANN R. et Mme PORTMANN.** — « A propos de la normalisation des appareils de correction auditive ». - Revue de Laryngologie, mai-juin 1954, p. 476.

8) **CONTURIE L.** — « Acoustique appliquée » - Paris, 1952, Eyrolles éd.

9) **DEHAUSSY J.** — « Aspects techniques et professionnels actuels de l'appareillage auditif » - Thèse Pharmacie, Paris, 1957.

10) **DJOURNO A., EYRIES Ch., VALLANCIEN B. et Mlle D. KAYSER.** — « Premiers essais d'excitation électrique du nerf auditif chez l'homme, par appareil inclus à demeure » - Comptes rendus de l'Académie de Médecine, p. 481, 1957.

11) **GOSSEREZ M.** — « Histoire de la Prothèse auditive » - Histoire de la Médecine, p. 3, sept. 1954.

12) **GOUDET G. et MEUNIEAU.** — « Les Semi-Conducteurs » - Paris, 1957, Eyrolles éd.

13) **GUEBERINA.** — « Revue de Laryngologie Otologie Rhinologie » publiée par PORTMANN G. - L'audiomètrie verbo-tonale, janv.-fév. 1956.

14) **« Hearing Aids »** — « An experimental Study of design objectives » - Harvard University Presse, 1947.

15) **HURE F.** — « Les Transistors » - Paris, 1954, Librairie de la Radio éd.

16) **JOURNAL OFFICIEL de la République Française.** — « Réglementation des appareils de correction auditive » - 16 juin 1955, p. 6146.

17) **KANTZER L.-M.** — « Les appareillages des Sourds par la prothèse électronique » - Thèse de Médecine, Paris, 1945.

18) **MADURO R.** — « Les surdités professionnelles » - Cours International d'audiologie clinique, p. 427, Paris, 1952, Maloine éd.

19) **MOTTE M.** — « Lexique des Transistors » - Paris, 1954, Editions techniques et professionnelles.

20) **MOTTE M.** — « Les Transistors » - Paris, 1954, Editions techniques et professionnelles.

21) **NAGER F.** — Discours prononcé au Congrès de l'Association des Médecins à Stockholm, mai 1947 Aide-Mémoire d'Acoustique Médicale. Certificat d'études complémentaires d'optique médicale et d'acoustique médicale de la Faculté de Pharmacie de Paris.

22) **QUOIDEBACH G.** — « Le Décibel » - Revue SUTIP, déc. 1957, p. 403.

23) **S A. La RADIOTECHNIQUE.** — « Les Applications pratiques des transistors à jonctions O.C 70 et O.C 71 » (Réf. 147-1-56) Paris.

24) **SAIAG A.** — « Les Différents types de surdité » - Revue SUTIP, sept. 1956 N° 3, p. 7.

25) **VAYSETTE J.** — « L'Audiomètrie » - L'Evolution Pharmaceutique - 1955, p. 15-17 et 1956 p. 21-22.

26) « **VOCABULAIRE ELECTROCHIMIQUE NORMALISÉ** » publié par Comité Français (groupe 08), publication C. 01.008 du 20 avril 1956.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION 9
Psychologie du Sourd 9
Inconvénients entraînés par la surdité 9
Rôle possible du Pharmacien 10

Chapitre I

NOTIONS SUR LE SON 12
A) Propagation du son 12
B) Application à l'acoustique physiologique 16
C) Production et réception du son 22
D) Impédance acoustique 25

Chapitre II

NOTIONS SUR L'OREILLE ET LES DIFFERENTS TYPES DE SURDITE 27
I. Notions sur l'Oreille 27
A) Description de l'oreille 27
B) Interprétation physique du fonctionnement de l'oreille 30
C) Sensibilité de l'oreille et fréquences 31
II. Différents types de surdité 36

Chapitre III

NOTIONS SUR LES PROTHESES AUDITIVES ET LES TRANSISTORS 41
I. Notions sur les prothèses auditives 41
1) Historique 42

2) Principe de la prothèse propre aux différentes périodes 44
II. Transistors 50
1° — Les semi-conducteurs 51
A) Notion sur la structure de l'atome 51
B) Cas du cristal indéfini 53
C) Cas du cristal réel 55
D) Cristal soumis à un champ électrique 56
1) Isolants 56
2) Conducteurs 57
3) Semi-conducteurs 58
2° — Actions de Contact : Diodes et Transistors 59
A) Redresseurs et diodes à semi-conducteurs 60
B) Transistors 61
C) Caractéristiques 64

Chapitre IV

APPAREILS DE MESURE EN PROTHESE AUDITIVE 69
I. Contrôle des fils et des piles 69
II. Lampemètre 70
1) Les tubes 70
2) Principe du lampemètre 71
3) Description du lampemètre 75
4) Tension des différentes électrodes 80
5) Réalisation du montage 80
6) Application pratique 81
III. Transistormètre destiné à mesurer les caractéristiques principales d'un transistor 84
A) Caractéristiques principales 84
B) Dispositifs réalisables et proposés pour la mesure des caractéristiques 84
1° avec oscillographe 84

2° sans oscillographe 86
C) Description et réalisation du montage 87
D) Utilisation de l'appareil 90
E) Application pratique 91
IV. Altération des caractéristiques qu'un usage prolongé amène dans les appareils de prothèse 93
A) Principe de la méthode des différentes mesures effectuées au département acoustique du C.N.E.T. 96
1) Courbe de réponse en fonction de la fréquence .. 96
2) Mesure de la distorsion 98
3) Mesure du gain acoustique 98
B) Caractéristiques des appareils utilisés 98
C) Alimentation sur secteur pour marche prolongée de ces appareils 102
D) Résultats obtenus 104
E) Conclusions 106
CONCLUSION GENERALE 108
BIBLIOGRAPHIE 111

Vu et approuvé,

Nancy, le 21 mai 1958

Le Doyen de la Faculté de Pharmacie,

F. KAYSER

Vu et permis d'imprimer

Nancy, le 22 mai 1958

Le Recteur de l'Académie,

Président du Conseil de l'Université,

G. MAYER

Imprimerie de la Plaine des Vosges - Mirecourt